

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dario Gorupić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Dario Gorupić

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju za izradu završnog rada.

Zahvaljujem se dr. sc. Maji Jurici, osoblju Laboratorija za zavarivanje i osoblju Laboratorija za zaštitu materijala na pomoći i strpljenju te što su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog rada.

Dario Gorupić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DARIO GORUPIĆ**

Mat. br.: **0035206883**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **CBT ZAVARIVANJE POCINČANIH LIMOVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **CBT WELDING OF ZINC COATED STEELS**

Opis zadatka:

Opisati i analizirati CBT – Controlled Bridge Transfer način prijenosa metala u električnom luku, te navesti prednosti i nedostatke kao i primjenu u industriji. Ukratko opisati tehnologiju nanošenja cinkove prevlake na osnovni materijal. Analizirati utjecaj pocinčanog sloja na tehnologiju zavarivanja te na metalurške i kvalitativne značajke zavara. Navesti postupke zavarivanja koji se primjenjuju pri zavarivanju pocinčanih limova.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je za limove manjih debljina na koje je nanesen sloj cinkove prevlake definirati tehnologiju zavarivanja, vrstu dodatnog materijala te zaštitnog plina. Za korištene parametre zavarivanja potrebno je odrediti njihov utjecaj na kvalitetu zavara kao i na postojanost pocinčanog sloja. U konačnici ocijeniti primjenjivost korištene tehnologije s obzirom na kvalitetu zavara i utjecaja na sloj cinkove prevlake.


U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

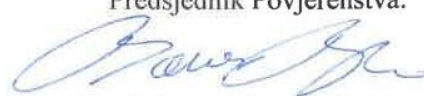
Zadatak zadan:
29. studenog 2018.

Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. CBT – CONTROLLED BRIDGE TRANSFER METODA	2
2.1 EN – CBT postupak	6
2.2 AC – CBT postupak	6
2.3 CBT – EX postupak	8
3. ZAŠTITA PREVLAČENJEM.....	11
3.1. Metalne prevlake	11
3.2 Priprema površine	12
3.2.1 Mehanička obrada	12
3.2.2 Kemijska obrada.....	13
3.2.3 Elektrokemijska obrada.....	13
3.2.4 Odmašćivanje	14
3.3 Pocinčani limovi.....	14
3.3.1 Cink.....	14
3.3.2 Primjena pocinčanih prevlaka	15
3.4 Postupci zaštite cinkovim prevlakama	17
3.4.1 Vruće uranjanje	17
3.4.2 Elektrokemijsko nanošenje cinka.....	20
3.4.3 Kemijsko nanošenje cinka.....	20
3.4.4 Šerardiziranje	21
3.4.5 Naštrcavanje	21
4. ZAVARIVANJE POCINČANIH LIMOVA.....	23
4.1 Cinkove pare i sigurnost pri zavarivanju.....	23
4.2 Svojstva zavara.....	24
4.3 Metode zaštite od plinova nastalih prilikom zavarivanja pocinčanih limova	25
4.4 Obnavljanje korozijske otpornosti	25
4.5 Alternativni dodatni materijali	26
4.6 Nastajanje pora i/ili pukotina u zavaru.....	26
4.7 Zavarivanje prije pocinčavanja	27

5. Postupci koji se koriste za zavarivanje pocinčanih limova	28
5.1 MIG/MAG zavarivanje	28
5.1.1 Postupak MIG/MAG zavarivanja pocinčanih limova	30
5.1.2 Zaštitni plinovi	31
5.1.3 Parametri zavarivanja	31
5.2 REL zavarivanje	32
5.3 Elektrootporno točkasto zavarivanje	33
5.4 Zavarivanje laserom	35
5.5 Lemljenje	36
5.5.1 Tvrd lemljenje [21]	38
5.5.2 Meko lemljenje [21]	39
5.5.3 MIG lemljenje	39
6. EKSPERIMENTALNI DIO	41
6.1 Mjerenje debljine pocinčanih slojeva i priprema za lemljenje	41
6.3 Postupak spajanja	43
6.4 Oprema	43
6.5 Tehnološki parametri lemljenja	46
6.5.1 Lemljenje limova sa debljinom prevlake 5 – 8 μm	47
6.5.2 Lemljenje limova sa debljinom prevlake 10 – 15 μm	51
6.5.3 Lemljenje limova sa debljinom prevlake 15 – 20 μm	55
6.6 Makroizbrusci i makroskopska analiza	60
6.6.1 Makroizbrusci	60
7. ZAKLJUČAK	67
LITERATURA	68
PRILOZI	70

POPIS SLIKA

Slika 1. Princip rada CBT metode zavarivanja [5].....	2
Slika 2. Kriterij za predviđanje uspostave električnog luka [4]	3
Slika 3. CBT prijenos metala snimljen u realnom vremenu pomoću visokobrzinske kamere [3]	4
Slika 4. Usporedba zavarivanja konvencionalnim MAG - om i CBT MAG - om [3]	5
Slika 5. Usporedba brzine taljenja žice pri pozitivnom polu i negativnom polu elektrode [3]..	6
Slika 6. Prijenos metala kod AC-CBT postupka u realnom vremenu [7]	8
Slika 7. Princip rada CBT - EX tehnologije MIG/MAG zavarivanja [6]	9
Slika 8. Usporedni rezultati pojave štrcanja pri CBT - EX i konvencionalnom MAG zavarivanju [6].....	10
Slika 9. Utjecaj pH vrijednosti na brzinu korozije cinka [9].....	15
Slika 10. Presjek cinkove prevlake izvedene postupkom vrućeg pocinčavanja [12]	19
Slika 11. Mikrografski prikaz kontinuiranih trakastih linija [1]	20
Slika 12. Shematski prikaz metalizacije [12]	22
Slika 13. Metode za poboljšavanje odvođenja plinova iz zavara nastalih pri zavarivanju [13]	25
Slika 14. Pora u zavaru [1]	26
Slika 15. Detalj MIG/MAG procesa zavarivanja [15]	28
Slika 16. Oprema za MIG/MAG zavarivanje [5]	29
Slika 17. Detalj REL zavarivanja [17]	32
Slika 18. Shema elektrotopnog točkastog zavarivanja [18].....	34
Slika 19. a) Detalj zavarivanja laserom pocinčanih limova b) Prikaz zavara s greškama [9]	36
Slika 20. Sile na granicama medija [14]	38
Slika 21. Detalj zalemljenog spoja [21]	39
Slika 22. Elcometer 456 Model B	41
Slika 23. Limovi stegnuti za radni stol.....	43
Slika 24. Daihen Varstroj Welbee-P500L.....	44
Slika 25. Sučelje za podešavanje načina rada i parametara lemljenja	44
Slika 26. Grafički prikaz stanice za robotizirano zavarivanje OTC Almaga AX – V6	45
Slika 27. Uzorak 1A: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara	48
Slika 28. Uzorak 2A: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara	49
Slika 29. Uzorak 3A: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara	50
Slika 30. Uzorak 4A: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara	51
Slika 31. Uzorak 1B: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara.....	52
Slika 32. Uzorak 2B: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara.....	53
Slika 33. Uzorak 3B: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara.....	54
Slika 34. Uzorak 4B: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara.....	55
Slika 35. Uzorak 1C: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara.....	56
Slika 36. Uzorak 2C: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara.....	57
Slika 37. Uzorak 3C: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara.....	58
Slika 38. Uzorak 4C: - gornja slika: lice zavara - donja slika: naličje zavara.....	59
Slika 39. Stroj za poliranje uzoraka	60
Slika 40. Makroizbrusak uzoraka 1A	61
Slika 41. Makroizbrusak uzorka 2A.....	61
Slika 42. Makroizbrusak uzorka 3A.....	62
Slika 43. Makroizbrusak uzorka 4A.....	62

Slika 44. Makroizbrusak uzorka 1B	63
Slika 45. Makroizbrusak uzorka 2B	63
Slika 46. Makroizbrusak uzorka 3B	64
Slika 47. Makroizbrusak uzorka 4B	64
Slika 48. Makroizbrusak uzorka 1C	65
Slika 49. Makroizbrusak uzorka 2C	65
Slika 50. Makroizbrusak uzorka 3C	66
Slika 51. Makroizbrusak uzorka 4C	66

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri zavarivanja AC - CBT metodom prijenosa metala [7]	7
Tablica 2. Vijek trajanja pocinčanih proizvoda u atmosferi [9]	16
Tablica 3. Metode nanošenja cinka [8]	17
Tablica 4. Najčešće korišteni zaštitni plinovi [21]	40
Tablica 5. Izmjerene vrijednosti pocinčanih limova	42
Tablica 6. Tehnički podaci izvora struje za zavarivanje	45
Tablica 7. Preostali parametri lemljenja uzorka 1A	47
Tablica 8. Preostali parametri zavarivanja uzorka 2A	48
Tablica 9. Preostali parametri zavarivanja uzorka 3A	49
Tablica 10. Preostali parametri zavarivanja uzorka 4A	50
Tablica 11. Preostali parametri zavarivanja uzorka 1B.....	51
Tablica 12. Preostali parametri zavarivanja uzorka 2B.....	52
Tablica 13. Preostali parametri zavarivanja uzorka 3B.....	53
Tablica 14. Preostali parametri zavarivanja uzorka 4B.....	54
Tablica 15. Preostali parametri zavarivanja uzorka 1C.....	56
Tablica 16. Preostali parametri zavarivanja uzorka 2C.....	57
Tablica 17. Preostali parametri zavarivanja uzorka 3C.....	58
Tablica 18. Preostali parametri zavarivanja uzorka 4C.....	59

POPIS KRATICA

KRATICA	OPIS OZNAKE
AC	Alternating current
AC – CBT	Alternating current – controlled bridge transfer
Al	Aluminij
Ar	Argon
CO ₂	Ugljični dioksid
CBT	Controlled bridge transfer
CBT – EX	Controlled bridge transfer – expanded
CV	Constant voltage
DC	Direct current
EN – CBT	Electrode negative – controlled bridge transfer
H ₂	Vodik
He	Helij
MAG	Metal active gas
MIG	Metal inert gas
N ₂	Dušik
WB	Welbee
Welbee	Welding best electronic engine
Zn	Cink
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
CV	%	Koeficijent varijacije
F	N	Sila pritiska elektrode
H _i	μm	Najviša vrijednost
I	A	Jakost struje lemljenja
L _o	μm	Najniža vrijednost
Q	kJ/cm	Unos topline
σ	-	Standardna devijacija
U	V	Napon
v _z	cm/min	Brzina lemljenja
η	-	Stupanj iskorištenja postupka lemljenja
\bar{x}	μm	Srednja vrijednost

SAŽETAK

Završni rad sastoji se od dva dijela, teorijski i eksperimentalni.

U teorijskom dijelu opisuje se CBT postupak prijenosa metala, varijante CBT postupka te navedeni su prednosti i nedostaci u odnosu na konvencionalno MIG/MAG zavarivanje. Opisana je metoda zaštite prevlačenjem, prevlačenjem metalne prevlake. Ukratko je opisana priprema površine materijala za prevlačenje. Dan je kratki opis cinka te navedena je primjena pocinčanih prevlaka. Uz to navedeni su postupci nanošenja zaštite cinkovim prevlakama. Opisuje se zavarivanje pocinčanih limova u smislu zaštite na radu, svojstvima i kvaliteti zavarenih spojeva te načinu zavarivanja. Navedeni su i opisani postupci koji se koriste za zavarivanje pocinčanih limova. Nakon obrađenog teorijskog dijela, proveden je eksperimentalni rad.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je lemljenje limova s različitim debljinama zaštitne prevlake cinka. Odabrani su konvencionalni MIG i CBT MIG način rada za istraživanje utjecajnih parametara na kvalitetu lemljenog spoja i na debljinu pocinčanog sloja u blizini zalemljenog spoja. Dobiveni uzorci zalemljenog spoja su makroskopski analizirani.

Ključne riječi: CBT proces prijenosa metala, pocinčavanje, MIG lemljenje

SUMMARY

This final thesis is composed from two parts, theoretical and experimental.

CBT metal transfer and a modified CBT welding methods are described in theoretical part, also advantages and disadvantages are described in relationship with conventional MIG/MAG welding. The protecting coating method is described, protecting with metal coatings. Briefly is described preparation of the material surface for the protecting coating. Besides, procedures for applying zinc coatings are described. Welding of galvanized sheet metal is described in terms of safety at work, properties and quality of welded joints and welding methods. The procedures for welding galvanized sheets are listed and described. After the elaborated theoretical part, experimental work was carried out.

In the experimental part, brazing of galvanized steels with different thickness of zinc coating was performed. The conventional MIG and CBT MIG brazing was selected for the study of influence parameters on the quality of the brazed joint and on the thickness of the galvanized layer near the brazed joint. The brazing samples were subjected to macroscopically analysis.

Key words: CBT metal transfer, galvanizing, MIG brazing

1. UVOD

Zavarivanje je široko rasprostranjena tehnologija spajanja koja se koristi u raznim industrijama (automobilskoj, kotlogradnji, brodogradnji, izgradnji cjevovoda i ostalima). Potrebno je zadovoljiti različite zahtjeve koji utječu na kvalitetu zavora. Zadaća je tehnologa zavarivanja ispuniti te zahtjeve. Zahtjevi koji se postavljaju pred tehnologa su zahtjevi sigurnosti i kvalitete zavarenog spoja, minimalnog utroška materijala i energije, minimalnih troškova izrade, osigurati zaštitu prilikom zavarivanja, te minimalno onečišćenje okoliša.

Zbog zadovoljavanja svih tih zahtjeva razvijen je MAG postupak zavarivanja. MAG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina. MAG zavarivanje razvijeno je u bivšem SSSR-u. MAG postupak zavarivanja jedan je od najčešće korištenih postupaka spajanja metala. Zbog niza prednosti, ponajprije zbog ekonomičnosti procesa te jednostavnije automatizacije procesa, MAG postupak razvija se i danas više od bilo kojeg drugog konvencionalnog postupka zavarivanja.

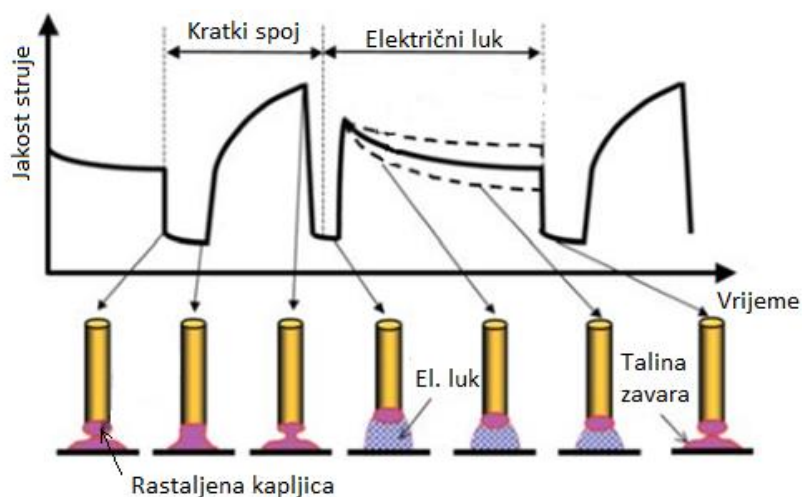
Cink je meki metal koji korodira sporo i relativno konstantnom brzinom. Također, cink je otporan na maziva i goriva. Različitim debljinama cinkove prevlake utječe se na zaštitu čelika od hrđanja ovisno o atmosferskim uvjetima u kojima se koriste pocinčani čelici. Prednosti korištenja cinka kao prevlake su njegova laka dostupnost i činjenica da je jedan od najjeftiniji obojenih metala. Osim cinka, kao prevlake na metalima koriste se i magnezijeve, aluminijeve te kalcijeve prevlake, ali ni jedan nije toliko efikasan kao cink. Zahtjevi koji se postavljaju na zavarivanje pocinčanih limova su smanjenje deformacija limova, kontrolirani unos topline, korozijska postojanost zavarenog spoja, smanjenje štrcanja. Radi zahtjeva za zavarivanjem pocinčanih čelika dovelo je do razvoja modificiranih postupaka MAG zavarivanja [1].

Jedan od modificiranih postupaka MAG zavarivanja je i CBT – Controlled Bridge Transfer koji predstavlja iskorak u razvoju MAG postupka. MAG CBT je modificirani način prijenosa metala koji kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MAG zavarivanja. CBT tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili eliminacijom štrcanja, a zbog precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline rezultira i mogućnošću zavarivanja korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča debljina manjih od promjera dodatnog materijala [2].

2. CBT – CONTROLLED BRIDGE TRANSFER METODA

MIG/MAG postupak prikladan je za zavarivanje tankih limova pomoću prijenosa metala kratkim spojevima. Prilikom prijenosa metala kratkim spojevima ostvaruje se minimalna količina topline koja je prikladna za zavarivanje tanjih radnih komada kao i zavarivanje korijenskog prolaza te zavarivanja u prisilnim položajima [2]. Nedostatak prijenosa metala kratkim spojevima je osjetljivost na štrcanje rastaljenih kapljica kao posljedica nestabilnog procesa. Automobilaska industrija najviše zahtjeva kontinuirano unapređivanje u pogledu produktivnosti ali i u smanjenju naknadne obrade kako bi se smanjila količina industrijskog otpada kao i dodatni troškovi nastali uklanjanjem posljedica štrcanja [3]. Trenutno najučinkovitiji postupak zavarivanja, u smislu male količine štrcanja, koristi se impulsno MIG/MAG zavarivanje ali se sve češće pojavljuju modificirani procesi. Prilikom korištenja klasičnog MIG/MAG postupka zavarivanja dolazi do veće količine štrcanja i to u trenutku ponovne uspostave električnog luka odmah nakon prekida kratkog spoja. Nova metoda prijenosa metala kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MIG/MAG zavarivanja uz koje minimalizira štrcanje te omogućuje stabilan električni luk uz primjenu različitih zaštitnih plinova. Nova metoda naziva se CBT, Controlled Bridge Transfer metoda. [4]

Princip rada CBT metode prikazan je slikom 1.

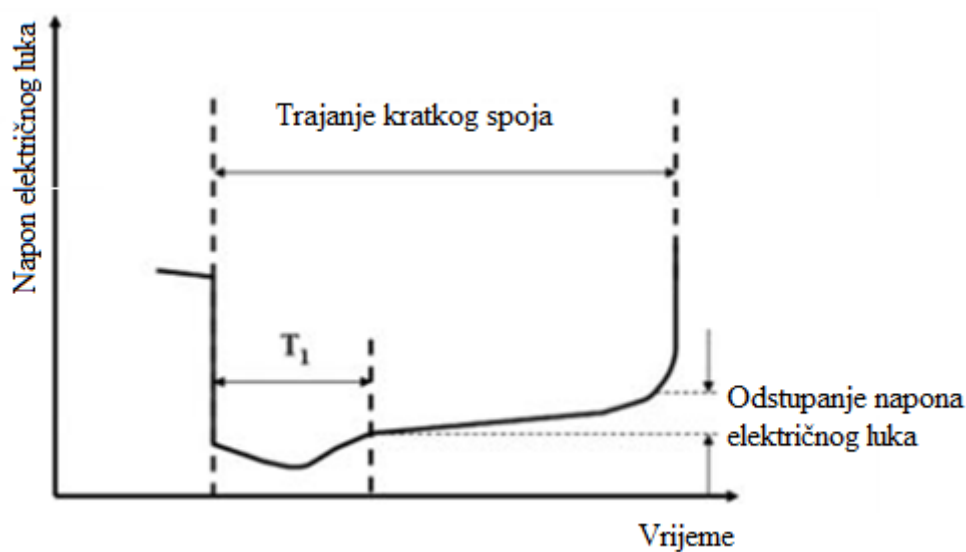


Slika 1. Princip rada CBT metode zavarivanja [5]

Kako bi se smanjila pojava štrcanja kada na rastaljeni metal djeluje sila „magnetskog štipanja“ ili „pinch efekta“, potrebno je precizno odrediti iznos pada napona u trenutku neposredno prije ponovne uspostave električnog luka. Zajedno sa padom napona, trenutačno dolazi i do pada vrijednosti jakosti struje (Slika 1.). Rezultat toga je da se prijenos rastaljenog metala s vrha elektrodne žice vrši isključivo pomoću površinske napetosti. Trenutak u kojem se odvija odvajanje kapljice može zbog različitih nepravilnosti varirati (npr. duljina slobodnog kraja žice; brzina zavarivanja; položaj zavarivanja; veličina, oblik i viskoznost rastaljene kapljice metala; ponašanje taline) [2]. Kako bi se nadoknadio gubitak energije zbog smanjenja jakosti struje u kratkom spoju te na taj način postigla odgovarajuća veličina kapljice metala i stabiliziranje električnog luka, u trenutku kada je električni luk uspostavljen jakost struje se naglo povećava.

Princip rada CBT metode se temelji na preciznom podešavanju jakosti struje optimalno prema varijabilnom parametru, naponu električnog luka [5].

Princip preciznog predviđanja trenutka uspostavljanja električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja prikazan je na slici 2. Uspoređujući slike 1 i 2 vidljivo je da nakon pojave kratkog spoja vrijednost napona pada u ovisnosti s padom jakosti struje kako bi se lakše kontrolirala pojava štrcanja. Period kratkog spoja u kojem napon još nije počeo rasti označen je s T_1 i napon u tom području se smatra referentnim naponom. Daljnje odstupanje od referentnog napona učestalo se mjeri te kada odstupanje dosegne definiranu graničnu vrijednost, dolazi do ponovnog uspostavljanja električnog luka.

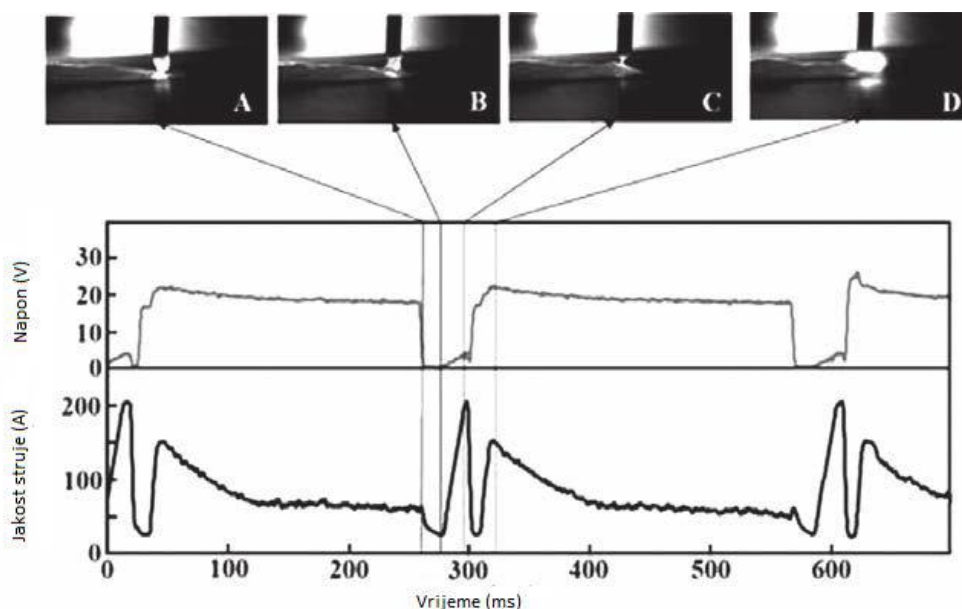


Slika 2. Kriterij za predviđanje uspostave električnog luka [4]

Opisana metoda prijenosa metala omogućuje precizno nadziranje procesa odvajanja rastaljene kapljice metala u svrhu predviđanja trenutka pojave kratkog spoja te ponovne uspostave električnog luka čime se minimalizira pojava štrcanja. Opisana tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili u potpunosti eliminacijom štrcanja, a zbog precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline omogućeno je zavarivanje korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča tanje od promjera dodatnog materijala (što smanjuje troškove izrade konstrukcije) [2].

Kod MAG postupaka zavarivanja sa zaštitnim plinom 80 % Ar + 20 % CO₂ optimalno odstupanje napona je u rasponu od 1,2 V do 2,0 V. Preciznim predviđanjem uspostave električnog luka i smanjivanjem struje neposredno prije uspostave električnog luka, rastaljena kapljica se prenosi u talinu zavora samo pomoću sila površinske napetosti i štrcanje se uspijeva kontrolirati [3].

Na slici 3 prikazuje se prijenos rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni metal pri CBT načinu prijenosa metala snimljenog pomoću visokobrzinske kamere. Prijenos rastaljene kapljice snimljen je u korelaciji s promjenom vrijednosti jakosti struje i napona zavarivanja. Zavarivanje je izvođeno sa žicom promjera 1,0 mm pri prosječnoj struji zavarivanja od 80 A, prosječnom naponu zavarivanja od 16,2 V i brzinom zavarivanja od 50 cm/min. Korišteni zaštitni plin je sastava 80 % Ar + 20 % CO₂ [3].

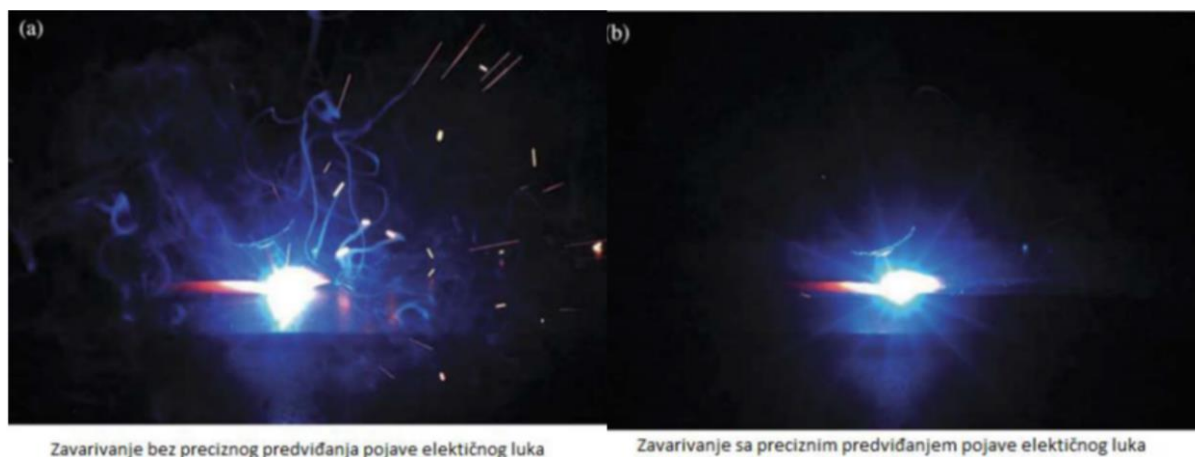


Slika 3. CBT prijenos metala snimljen u realnom vremenu pomoću visokobrzinske kamere [3]

Kadar A prikazuje trenutak odmah nakon prekida kratkog spoja. Daljnjim odmicanjem vremena na kadrovima B i C moguće je vidjeti prijenos rastaljene kapljice prema talini zavara te njen istisnut oblik na vrhu kapljice. Kadar C prikazuje trenutak prije ponovne uspostave električnog luka kada je jakost struje već smanjena, tako da kada se ponovno uspostavi električni luk, kadar D, ne dolazi do štrcanja.

Slikom 4 prikazuje se pojava štrcanja prilikom različitih duljina slobodnog kraja žice u rasponu od 5 do 35 mm. Ovaj raspon je puno veći nego normalni, koristi se kako bi se odredila učinkovitost preciznog predviđanja pojave električnog luka i stabilnost električnog luka tokom zavarivanja.

Slika 4 (a) prikazuje slučaj zavarivanja konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja bez preciznog predviđanja pojave električnog luka. Pošto je predviđanje pojave električnog luka bilo namješteno na duljinu slobodnog kraja žice od 5 mm, s povećanjem duljine slobodnog kraja žice sve više su rasle krive detekcije ponovnog uspostavljanja električnog luka, a s time je rasla i veća količina štrcanja. Zbog lažnih detekcija uspostavljanja električnog luka, struja kratkog spoja bila je neadekvatna što je dovelo do neuravnoteženog taljenja žice u kratkom spoju i nestabilnog električnog luka. Slika 4 (b) prikazuje slučaj zavarivanja sa CBT metodom prijenosa metala. Povećanjem slobodnog kraja žice, pojava štrcanja ostala je minimalna. Preciznim predviđanjem pojave električnog luka te kontroliranjem struje zavarivanja smanjilo se štrcanje te omogućeno je stabilno zavarivanje.



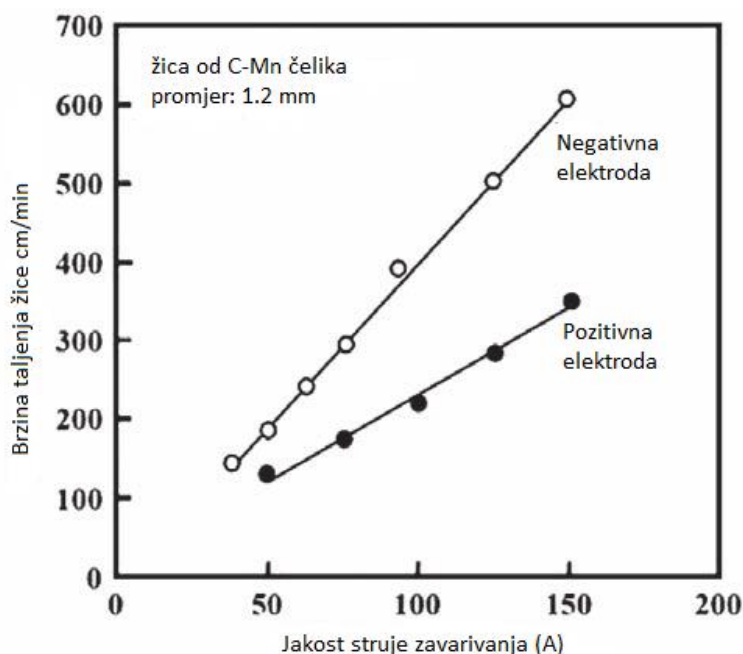
Zavarivanje bez preciznog predviđanja pojave električnog luka

Zavarivanje sa preciznim predviđanjem pojave električnog luka

Slika 4. Usporedba zavarivanja konvencionalnim MAG - om i CBT MAG - om [3]

2.1 EN – CBT postupak

CBT način prijenosa metala može se koristiti kod zavarivanja sa žicom spojenom na negativni pol (Electrode Negative; u daljnjem tekstu EN-CBT) što omogućuje mali unos topline i minimalizirano štrcanje. Pri EN-CBT postupku količina topline u žici je veća nego kod CBT postupka sa žicom spojenom na pozitivan pol. Na slici 5 prikazana je usporedba brzina taljenja žice promjera 1,2 mm kada je spojena na pozitivan pol i kada je spojena na negativan pol u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂. Kod zavarivanja s EN-CBT postupkom vrijednost struje zavarivanja je približno 2/3 vrijednosti struje kod zavarivanja s pozitivnom elektrodom pri jednakoj količini depozita, tj. EN-CBT omogućuje manji unos topline pri jednakoj količini depozita nego kod zavarivanja s elektrodom spojenom na pozitivan pol [5].



Slika 5. Usporedba brzine taljenja žice pri pozitivnom polaritetu i negativnom polaritetu elektrode [3]

2.2 AC – CBT postupak

AC – CBT (Alternative Current – CBT) postupak je inačica klasičnog CBT postupka gdje se koristi izmjenična struja s malom frekvencijom izmjene pozitivnog i negativnog pola. Vrijeme trajanja negativnog polariteta i pozitivnog polariteta se mjeri pomoću frekvencije i omjera negativnog i pozitivnog polariteta. Iako je brzina taljenja žice za vrijeme negativnog

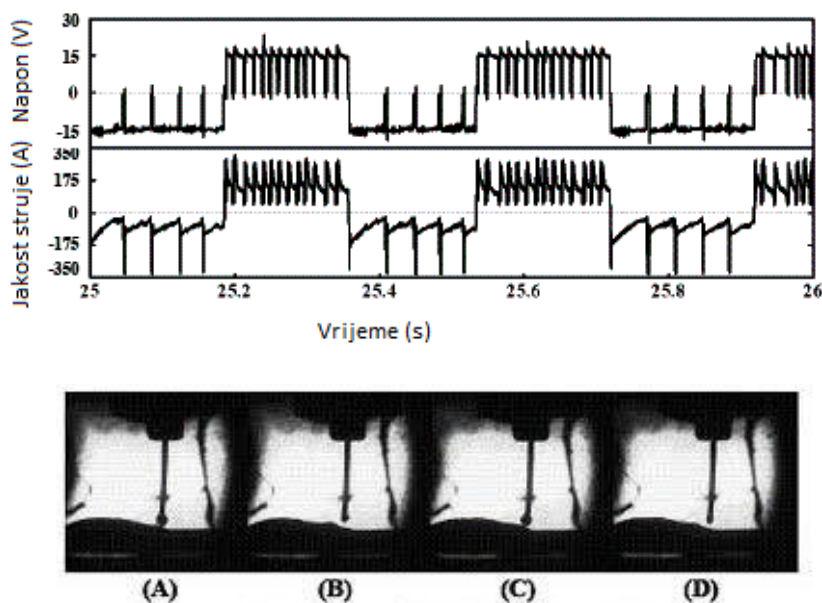
polariteta otprilike 1,5 puta veća, može se postići stabilan prijenos metala za vrijeme oba polariteta. Ta stabilnost se prvenstveno postiže pomoću novo razvijenih uređaja i mikroprocesora koji omogućuju preciznu kontrolu karakteristika električnog luka (jakost struje, napon) za vrijeme oba polariteta [5].

Slika 6 prikazuje prijenos rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni metal pri AC – CBT načinu prijenosa metala snimljen visokobrzinskom kamerom s mogućnošću snimanja 6000 slika u sekundi. Prijenos rastaljene kapljice snimljen je u korelaciji s promjenom vrijednosti jakosti struje i napona zavarivanja. Parametri korišteni pri zavarivanju su navedeni u tablici 1 [5].

Tablica 1. Parametri zavarivanja AC - CBT metodom prijenosa metala [7]

Jakost struje, A	100
Napon, V	15,0
Promjer žice, mm (YGW12)	1,2
Zaštitni plin	80 % Ar + 20 % CO ₂
Brzina zavarivanja, cm/min	50
Frekvencija, Hz	3,0
Omjer + i - polariteta, %	50

Kadar A na slici 6 prikazuje trenutak prijenosa metala u vrijeme mjerenja ekvivalentan trenutku mjerenja jakosti struje i napona od 25 sekundi. U tom trenutku električni luk je u drugoj polovici pri negativnom polaritetu. Kadar B prikazuje rastaljenu kapljicu u trenutku ponovnog uspostavljanja električnog luka nakon prolaska kratkog spoja. Kadar C prikazuje trenutak od 25,2 sekunde neposredno prije prelaska polariteta iz negativnog u pozitivan. Vidljivo je da rastaljena kapljica ima gotovo identičan oblik i veličinu kao u kadru A. Na kadru C se vidi da je štrcanje spriječeno i kod ponovne uspostave električnog luka neposredno nakon promjene polariteta [5].



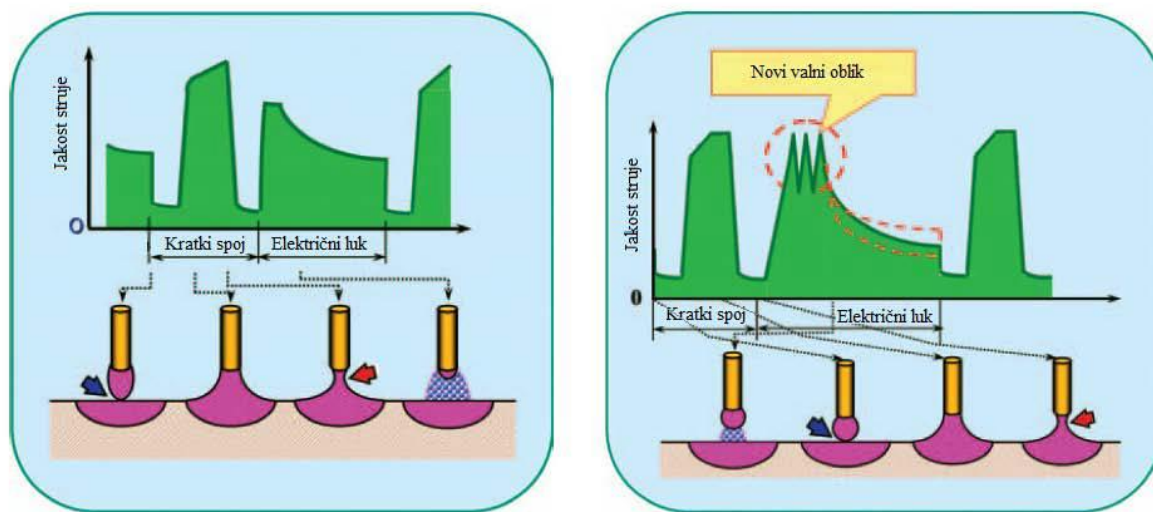
Slika 6. Prijenos metala kod AC-CBT postupka u realnom vremenu [7]

Prednost ovog postupka je smanjivanje penetracije s povećanjem omjera negativnog polariteta. Kao rezultat toga, uz preciznu kontrolu unosa topline u osnovni materijal ostvareno je i jednostavno kontroliranje oblika zavora. Isto tako se smanjila pojava štrcanja do 6 puta s obzirom na klasični AC-MAG [7].

2.3 CBT – EX postupak

Klasičnim CBT načinom prijenosa metala moguće je smanjiti pojavu štrcanja samo u rasponu parametara koji odgovaraju prijenosu metala kratkim spojevima. Pojačavanjem parametara dolazi do krupnokapljicastog (globularnog) prijenosa metala koji se koristi kako bi se povećala proizvodnost procesa i brzina zavarivanja. U tom rasponu parametara više nije moguće koristiti konvencionalni CBT MIG/MAG postupak zavarivanja već ga je potrebno nadograditi, odnosno primijeniti novu verziju: eng. Controlled Bridge Transfer – Expanded, CBT – EX. Slika 7 prikazuje princip rada CBT – EX MIG/MAG postupka zavarivanja. Smanjenje pojave štrcanja prije ponovne uspostave električnog luka slična je kao i u slučaju CBT MIG/MAG postupka zavarivanja. Da bi prilikom krupnokapljicastog prijenosa predvidjela ponovna uspostava električnog luka, razvijen je novi visokoprecizni i visokobrzinski Welbee mikroprocesor [6]. Osim predviđanja uspostave električnog luka pomoću ovog mikroprocesora moguće je i formirati rastaljenu kapljicu metala odgovarajućim

dimenzijama i oblika na samom vrhu elektrode i to pomoću fine regulacije duljine električnog luka [5].



a) Klasični valni oblik struje za MIG/MAG zavarivanje

b) Valni oblik struje pri zavarivanju u 100 % CO₂ atmosferi

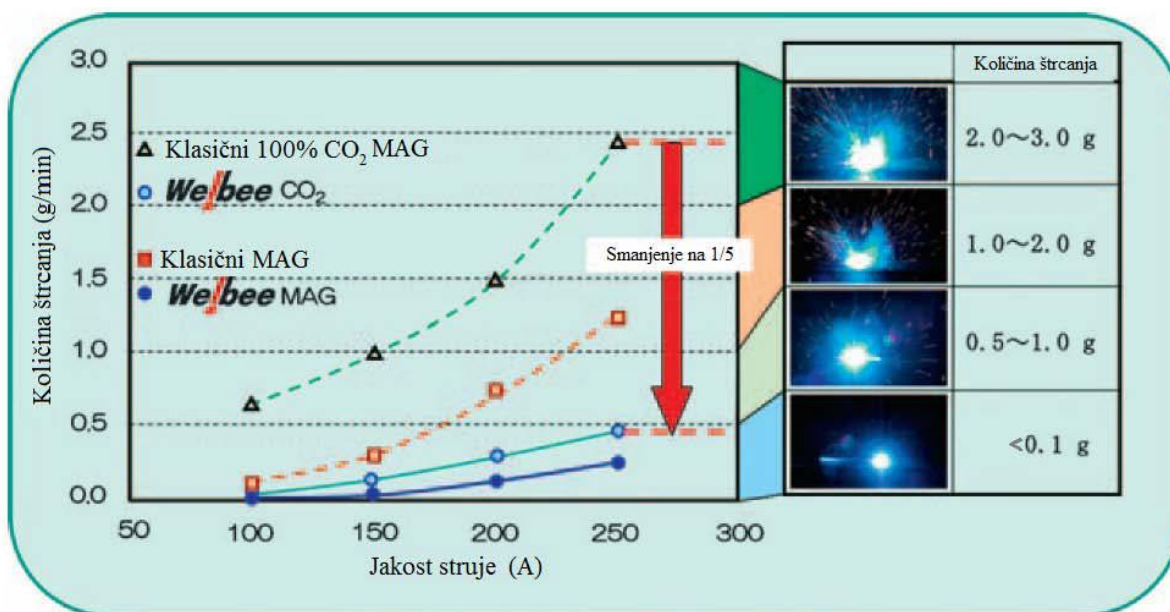
Slika 7. Princip rada CBT - EX tehnologije MIG/MAG zavarivanja [6]

Na slici 7a prikazan je općeniti valni oblik struje za MIG/MAG zavarivanje. Vidljivo je da u trenutku prije uspostave električnog luka, struja kratkog spoja naglo pada što uzrokuje i smanjenje učinka taljenja dodatnog materijala s obzirom na to da je kod krupnokapljicastrg prijenosa metala brzina dodavanja žice veća nego što je to u slučaju prijenosa metala kratkim spojevima. Kako bi se nadoknadio gubitak energije, zbog smanjenja jakosti struje kratkog spoja, i na taj način se postigla odgovarajuća veličina rastaljene kapljice metala, u trenutku uspostave električnog luka jakost struje se naglo povećava. Nakon toga, jakost struje koja se mijenja u realnom vremenu ovisno o metodi prijenosa metala i ponašanju taline, regulira duljinu električnog luka. Novo razvijeni valni oblik struje ima za posljedicu još veće smanjenje napona pri zavarivanju čime se omogućuje manji unos topline i veće brzine zavarivanja pa se zbog toga može primjenjivati kod zavarivanja korijena sučeljenog spoja cijevi [3].

Na slici 7b prikazan je valni oblik struje pri zavarivanju u zaštiti 100 % CO₂. Uzrok štrcanja pri krupnokapljicastrg prijenosu metala su izlazi plinova iz taline i/ili rastaljene kapljice zbog predgrijavanja visokom strujom zavarivanja. Zbog karakteristične primjene CBT - EX tehnologije zavarivanja (zavarivanje velikim brzinama), potrebno je održavati kratki električni luk. Kratki električni luk može uzrokovati povremenu pojavu kratkih spojeva što dovodi do

hlađenja metala zavariva. Štrcanje pored navedenih pojava može uzrokovati i djelovanje odbojne sile na rastaljenu kapljicu zbog disocijacije ugljičnog dioksida (CO_2) na ugljični monoksid (CO) i kisik (O_2). Da bi se spriječilo i izbjeglo djelovanje odbojne sile na kapljicu izvršena je promjena u valnom obliku struje. Promjena se očituje u trokutastom profilu valnog oblika struje koji se dodaje na osnovnu struju za vrijeme trajanja električnog luka (Slika 7b). Na takav način se postiže stabilan prijenos metala, regulacija trajanja električnog luka i optimalan omjer pojave kratkog spoja/električnog luka pri parametrima koji inače karakteriziraju krupnokapljicašti prijenos metala [6].

Slika 8 prikazuje usporedne rezultate pojave štrcanja pri variranju jakosti struje (od 100 A do 250 A) i tehnologije zavarivanja (konvencionalni MAG i CBT – EX MAG). Korišten je dodatni materijal promjera 1,2 mm, a brzina zavarivanja iznosila je 100 cm/min. Najveća razlika u količini štrcanja primijećena je kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2 . U navedenom slučaju je pri CBT – EX MAG zavarivanju postignuto smanjenje štrcanja na 20 % (0,5 g/min) od ukupne količine štrcanja kod konvencionalnog MAG zavarivanja (2,5 g/min).



Slika 8. Usporedni rezultati pojave štrcanja pri CBT - EX i konvencionalnom MAG zavarivanju [6]

3. ZAŠTITA PREVLAČENJEM

Korozija metala može se zakočiti ili spriječiti nanošenjem prevlaka koje u prvom redu služe kao barijera prema agresivnom mediju. Razumije se da materijal prevlake mora biti što postojaniji prema tom mediju.

Prevlake se dijele na metalne i nemetalne, a nemetalne mogu biti organske i anorganske [8].

Zaštitno djelovanje prevlaka ovisi o vrsti prevlake, o stupnju kompaktnosti, o njenoj debljini i o čvrstoći prijanjanja. S obzirom na to, na kvalitetu prevlake znatno utječe postupak nanošenja, koji uključuje predobradu metalne prevlake za prevlačenje, nanošenje u užem smislu i završnu obradu prevlake, koja ponekad nije potrebna ovisno o postupku prevlačenja [8].

Prevlake se često koriste i za zaštitu od mehaničkog trošenja, estetskih razloga, ili pak regeneraciju istrošenih dijelova. Zaštitno djelovanje prevlake ovisi o vrsti prevlake, njenoj debljini, o stupnju kompaktnosti i čvrstoći prijanjanja, te postupku samog nanošenja koji uključuje predobradu metalne površine za prevlačenje, nanošenjem u užem smislu i završnu obradu prevlake [9].

3.1. Metalne prevlake

Metalne se prevlake nanose kada je uz antikorozivnu zaštitu važan metalni karakter površine, npr. radi čvrstoće i tvrdooće, otpornost prema habanju, toplinske ili električne vodljivosti itd. Među postupcima nanošenja metalnih prevlaka tehničko značenje imaju metode vrućeg uranjanja, difuzijske metalizacije, metalizacije prskanjem, fizikalne i kemijske metalizacije iz parne faze, metode oblaganja (platiniranja, navarivanja), galvanotehnike, ionske izmjene i katalitičke redukcije [8].

Metalne se prevlake mogu nanositi uranjanjem osnovnog metala u talinu pokrivnog metala. Pritom moraju biti ostvarena dva uvjeta: da osnovni metal ima mnogo više talište od pokrivnog i da se oba metala legiraju, bilo međusobnim otapanjem ili tvorbom intermetalnih spojeva. Na površini podloge u tijeku obradbe nastaje legura na kojoj pri vađenju zaostaje film taline. On se hlađenjem skrućuje tako da se prevlaka sastoji od površinskog sloja prema sastavu istovjetnog talini i od međusloja legure u kojoj se udio osnovnog metala povećava s udaljenošću od površine prevučenog predmeta [8].

Međusloj osigurava vrlo čvrsto prijanjanje prevlake uz podlogu, ali je nastala legura obično krhka pa je, u pravilu, poželjno da njezina debljina bude što manja [8].

Dobivanje kvalitetne prevlake vrućim uranjanjem moguće je samo onda ako talina potpuno kvasi sve obrađivane plohe. Da bi to bilo izvedivo, potrebno je predobraditi plohe da bi se osigurala potpuna čistoća površine podloge i taline.

Vrućim se uranjanjem najčešće nanose prevlake cinka, kositra, olova, Pb-legura i aluminija, i to obično na ugljični čelik ili lijevano željezo, a rjeđe na bakar, Cu-legure i druge metale [8].

Priprema predmeta najčešće se izvodi [1]:

- Mehanički,
- Kemijski,
- Elektrokemijski,
- Odmašćivanje.

3.2 Priprema površine

3.2.1 Mehanička obrada

Ovom vrstom obrade skidaju se korozijski produkti, a primjenjuje se nekoliko tipova postupaka [9]:

- Brušenje – grubo ili fino, provodi se čvrstim ili elastičnim kolutovima s abrazivom ili neprekidnom trakom s abrazivom,
- Poliranje - izvodi se s pastom ili prahom za poliranje i koristi se za uklanjanje zaostalih neravnina nakon brušenja,
- Obrada u bubnjevima – provodi se za sitne predmete koji nisu osjetljivi na udarce uz rotiranje s abrazivom (kvarcni pijesak, korund),
- Četkanje – vrši se skidanje rahlih korozijskih produkata s površine metala četkama od metalne žice ili perlona. Za strojnu obradu koriste se rotirajuće četke,
- Pjeskarenje – služi za uklanjanje korozijskih produkata, te stare metalne ili nemetalne prevlake, i to u struji kvarcnog pijeska ili korunda s komprimiranim zrakom. Korund je puno bolje rješenje jer ne stvara za zdravlje opasnu silikatnu prašinu koja izaziva teške bolesti dišnih organa (silikoza),
- Mlaz vode s dodacima pijeska – služi za mehaničko uklanjanje nečistoća i smanjuje prašinu u zraku,

- Sačmarenje – provodi se mlazom čelične sačme pomoću specijalnih mlaznica, postupak je vrlo sličan pjeskarenju.

3.2.2 Kemijska obrada

Kemijska priprema podloge za prevlačenje obavlja se spontanom ili elektrolitičkim reakcijama, pa se postupci dijele na obične kemijske i elektrokemijske (elektrolitičke). Tim se postupcima odstranjuju korozijski produkti (dekapiranje ili nagrivanje) ili se kondicionira površina podloge (nemehaničko poliranje i posvajivanje te najedanje) [10].

Pri korištenju ovog tipa obrade uvijek postoje određeni zahtjevi kao što su brzo otapanje korozivskih produkata, niska cijena, neotrovnost, mogućnost regeneriranja, neisparljivost i što manje otapanja metala koje se sprječava dodatkom inhibitora. Kiselinsko dekapiranje se najčešće izvodi u otopinama klorovodične ili sumporne kiseline za čelike, dok dušične kiseline se koriste za bakar. Lužnato dekapiranje najčešće se izvodi u otopinama natrijevog hidroksida [9].

3.2.3 Elektrokemijska obrada

Elektrokemijska obrada sadrži dva tipa obrade, a to su elektrokemijsko nagrivanje i elektrokemijsko poliranje.

Pomoću elektrokemijskog nagrivanja uklanjaju se oksidi i drugi produkti korozije s površine metala, uronjenog u elektrolit, istosmjernom strujom. Može biti anodno ili katodno. Kod anodnog nagrivanja metal je spojen kao anoda i postižu se vrlo dobri rezultati kod predmeta koji nemaju veće izbočine ili udubljenja zbog ravnomjernije podjele gustoće struje. Kod katodnog nagrivanja metal je spojen kao katoda i nalazi se u otopini kiseline, te se na njemu razvija vodik koji mehanički odstranjuje okside s površine metala. Kod ovog tipa nagrivanja nema bojazni od otapanja metala, ali postoji opasnost od vodikove krhkosti koja se može spriječiti kombiniranjem anodnog i katodnog nagrivanja.

Elektrokemijsko poliranje je postupak u kojem se dolazi do promjene metalne strukture zbog topline oslobađanja trenjem (za razliku od mehaničkog poliranja). Dijelovi koji moraju biti podvrgnuti elektropoliranju su spojeni kao anode u elektrolitu određenog sastava i koncentracije [1].

3.2.4 Odmašćivanje

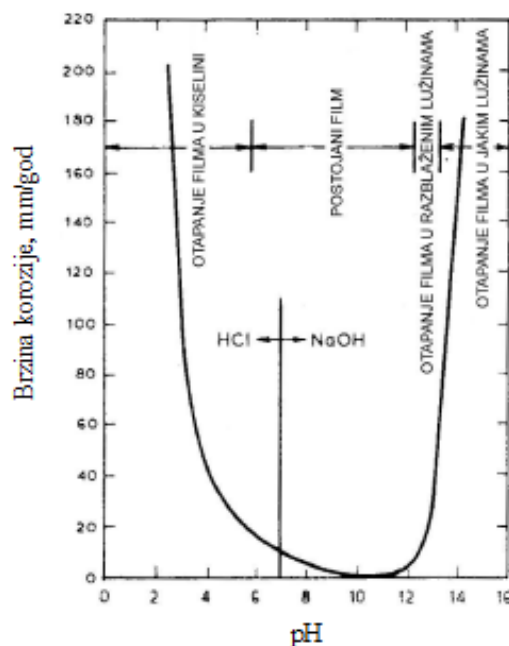
Odmašćivanje je postupak koji služi za odstranjivanje mineralnih i bioloških masnih tvari, tj. teških ugljikovodika iz nafte, odnosno triglicerida masnih kiselina iz biljki, životinja ili ljudi s površine metala i neophodno je kod pripreme površine za nanošenje prevlaka kako bi prevlaka što bolje prijanjala na metalnu površinu. Postoje četiri vrste postupaka: pomoću lužnatih otopina, pomoću organskih otapala, elektrokemijsko odmašćivanje i odmašćivanje ultrazvukom [9].

3.3 Pocinčani limovi

3.3.1 Cink

Cink je neplemeniti metal sklon u nekim sredinama kemijskoj pasivnosti zbog nastajanja netopljivih kompaktnih slojeva produkata korozije. U prirodi ga nema u elementarnom stanju. Cink komercijalne čistoće je metal plavkasto - bijele boje koja potječe od finog površinskog sloja karbonata, a potpuno čist cink je srebrne boje. Ima gustu heksagonalnu kristalnu rešetku. Nisko talište ($419,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) i prilično loša mehanička svojstva koja se osim toga uz pojavu krhkosti naglo pogoršavaju iznad $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ te ograničavaju primjenu cinka kao konstrukcijskog materijala [9].

Najraširenija upotreba cinka je u obliku prevlaka jer one vrlo djelotvorno štite ugljični čelik od korozije u atmosferi i u prirodnim vodama zbog zaštitnog djelovanja spomenutih produkata vlastite korozije. Čak ako su Zn - prevlake porozne i oštećene, one će u elektrolitima ipak katodnom zaštitom sprečavati korozijsko razaranje čelika. Nadalje, sporom korozijom prevlaka lokalno se povisuje pH - vrijednost, što također djeluje zaštitno na ogoljena mjesta čelične površine. Cink je vrlo nepostojan u atmosferi vrlo zagađenoj kloridima (npr. u neposrednoj blizini mora ili kemijskih tvornica). Cink je obično dosta otporan na vodu te na slabo kisele, neutralne i slabo lužnate otopine jer se i u takvim sredinama često kemijski pasivira. Slikom 9 prikazano je ponašanje cinka u različitim otopinama ovisno o pH vrijednosti, od $\text{pH} = 0$ do $\text{pH} = 16$ [10].



Slika 9. Utjecaj pH vrijednosti na brzinu korozije cinka [9]

Cinkove prevlake debljine 25 μm štite čelik od hrđanja 10 do 30 godina u ruralnoj, 8 do 16 godina u primorskoj i 4 do 6 godina u industrijskoj atmosferi. Cink korodira prilično sporo ($< 0,05 \text{ mm/god}$) čak i u morskoj vodi. Prosječna brzina prodiranja korozije u tlu koje nije kiselo također je mala i obično iznosi $< 0,1 \text{ mm/god}$.

Cink je jedinstven i vrlo koristan metal, posebno u ulozi tankih prevlaka. Može se koristiti kao čista prevlaka ili može biti u kombinaciji sa ostalim materijalima u cilju sprečavanja korozije na čeličnim površinama. Karakteristike relativne inertnosti prema atmosferskim uvjetima i dovoljna reaktivnost pri zaštiti čelika čine ga jedinstvenim. Njegove prednosti su još laka dostupnost i činjenica da je jedan od najjeftinijih obojenih metala.

Iako se i ostali metali mogu koristiti, kao prevlake na čelicima kao što su magnezij, aluminij i kalcij, nijedan se nije pokazao dovoljno koristan i efektivan kao cink [9, 10]

3.3.2 Primjena pocinčanih prevlaka

Prvenstveno, cinčane prevlake koriste se u svrhu zaštite od korozije. Primjena im je u mostogradnji, zgradama, brodovima, cjevovodima, automobilska industrija, kemijsko – obradna oprema, elektranama, ispušni dimnjaci, spremnici za pohranu vode i kotlovima [9].

Pocinčani čelici nude kombinaciju sljedećih svojstava [1]:

- Visoka čvrstoća,
- Oblikovljivost,
- Mala težina,
- Korozijska otpornost,
- Estetika,
- Niska cijena.

Navedena svojstva se ne mogu kvalitetno postići niti jednim drugim materijalom. Pocinčane prevlake su anodne za čelične podloge i najvažnije je da se ponašaju kao barijere. Iz tog razloga, anodne prevlake su često pokrivene ili površinski obrađene da bi spriječile razne vrste korozijskih penetracija na površinama čelika. Anodne prevlake imaju negativniji elektrodni potencijal od elektrodnog potencijala metala koji se zaštićuje. Anodne prevlake zaštićuju temeljni metal od korozije ne samo mehanički već i elektrokemijski. Poželjno je da se te prevlake primjenjuju putem procesa koji minimizira poroznost same prevlake. Odabir debljine prevlake ovisi o uvjetima okoliša, a najčešće varira između 50 i 500 μm [9].

Životni vijek prevlake od cinka, debljine 255 μm , iznosi oko 25 godina koji bi se mogao produžiti za 15-tak godina kada bi na tu prevlaku nanijeli vinilni završni premaz.

Cijena se izračunava po kilogramu pocinčane robe, a ovisi o nekoliko faktora kao što su: količina robe koju je potrebno pocinčati, dimenzije materijala, debljina i sama površina materijala, a kreće se od 3 do 6 kn/kg [11].

Tablicom 2 prikazano je približno vrijeme trajanja pocinčanih proizvoda u atmosferi za različite debljine prevlake. To su samo procjene, ali one ukazuju na to da kada se primjeni trajni film, cink daje korozijsku zaštitu proporcionalno sa debljinom prevlake [9].

Tablica 2. Vijek trajanja pocinčanih proizvoda u atmosferi [9]

DEBLJINA, μm	RURALNO PODRUČJE, god.	MORSKO PODRUČJE, god.	BLAŽE MORSKO PODRUČJE, god.	PREDGRAĐE, god.	GRAD, god.	INDUSTRIJSKO PODRUČJE, god.
3,6	50	40	35	30	25	15
2,3	35	30	25	20	17	9
1,8	25	20	15	12	10	7
1,1	10	8	7	5	4	3
0,66	7	6	5	4	3	2
0,44	5	4	3	3	2	1

3.4 Postupci zaštite cinkovim prevlakama

Postoji nekoliko metoda nanošenja cinka na čelične površine (tablica 3). Svaki od tih procesa ima svoje jedinstvene karakteristike [8].

Tablica 3. Metode nanošenja cinka [8]

	Metode nanošenja cinka na metalnu površinu
1.	Vruće uranjanje: <ul style="list-style-type: none"> - Vruće uranjanje poslije obrade - Kontinuirano linijsko
2.	Elektrokemijsko nanošenje cinka
3.	Kemijsko nanošenje cinka
4.	Šerardiziranje
5.	Naštrecavanje
6.	Premazi: <ul style="list-style-type: none"> - Organski - Anorganski

Debljina nanesenog sloja cinka ovisi od postupka.

3.4.1 Vruće uranjanje

Vruće uranjanje je jedna od važnih metoda fizikalne metalizacije pri kojem se metalna roba umače u rastaljeni cink, pa prevlaka cinka nastaje nakon vađenja iz taline skrućivanjem filma zaostalog na obratku zbog kvašenja.

Za primjenu vrućeg uranjanja glavni je uvjet da talište podloge bude mnogo više od tališta prevlake. Drugi je uvjet kvalitetnog prevlačenja ovim postupkom mogućnost međusobnog legiranja metala podloge i prevlake. Naime, da bi prevlaka čvrsto prionula na podlogu, mora se između njih oblikovati sloj legure, što se zbiva tijekom uranjanja nastajanjem kristala mješanaca. Naknadnom kemijskom reakcijom mogu se eventualno pojaviti i intermetalni spojevi. Povoljnije je uzajamno otapanje metala tvorbom mješanaca jer su intermetalni spojevi često prekrhki.

Budući da je potpuno kvašenje obratka talinom nužno za dobivanje kvalitetne prevlake, pripremom podloge valja osigurati savršenu čistoću njezine površine, što se postiže završnim čišćenjem tzv. fluksiranjem.

Temperatura taline mora biti za 20 do 80 °C viša od tališta, pa se pri pocinčavanju kreće oko 450 °C. Za provlačenje ploča i traka kroz talinu služe parovi valjaka. Vrijeme uranjanja mora biti dovoljno dugo da se predmeti ugriju do temperature taline (ako nisu predgrijani) i da se na njima oblikuje međusloj legure. Za to obično treba 2 do 10 min, od čega je samo ≈ 1 min dovoljna za stvaranje međusloja. Metalne se kade griju plamenom, elektrootporno, radijacijski ili indukcijski.

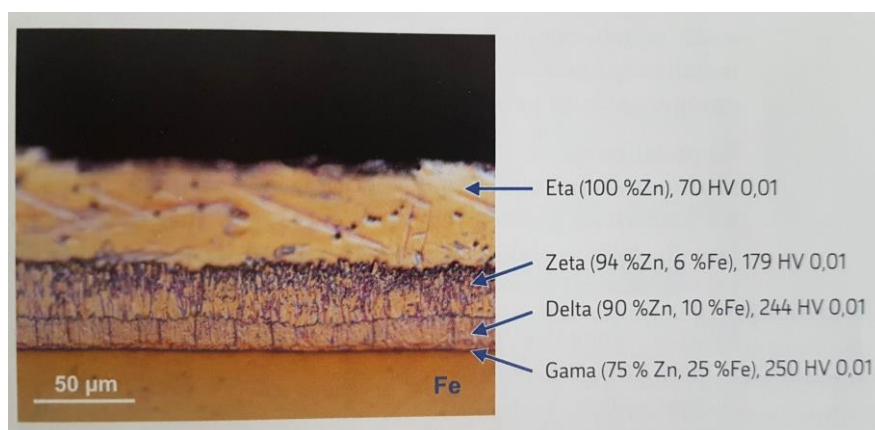
Cinkovoj se talini redovito dodaje 0,005 do 0,3 % Al. Neznatan udio Al povišuje sjaj prevlake, a nešto veći udio smanjuje viskoznost taline i koči stvaranje krhkog međusloja legure, pa se dobivaju tanje i žilavije prevlake [10].

Vrućim uranjanjem spontano nastaju predebele prevlake (do 100 μm), a postoji opasnost i od neravnomjerne debljine te od krhkosti. Deblje se prevlake dobiju na nižoj temperaturi zbog veće viskoznosti i površinske napetosti taline. Prevelika debljina, neravnomjernost i hrapavost prevlaka mogu biti posljedica prebrzog vađenja iz taline jer se talina ne stigne ocijediti, dok presporo vađenje smanjuje proizvodnost. Stanjivanje prevlaka pri izranjanju ploča, traka i žica izvodi se pomoću brisača, valjaka i sapnica [10].

3.4.1.1 Vruće uranjanje poslije obrade

To je jedna od prvih metoda koja se koristila za prevlačenje cinkom. Vrlo je učinkovita i kontinuirano se koristi već godinama sa malim poboljšanjima. Taj proces ima vrlo širok raspon primjene od najsitnijih dijelova kao što su vijci i matice pa sve do velikih kao što su spremnici, kontejneri, šine... [9].

Na slici 10 dan je presjek mikrostrukture pocinčane čelične površine te raspored tvrdoća pojedini faza pocinčane prevlake. Iz slike se vidi da se prevlaka cinka sastoji od γ , δ , ζ i η -faza. η - eta faza sadrži 100% Zn, ζ - zeta faza sadrži 94% Zn i 6% Fe, δ - delta faza sadrži 90% Zn i 10% Fe dok γ - gama faza sadrži 75% Zn i 25% Fe.



Slika 10. Presjek cinkove prevlake izvedene postupkom vrućeg pocinčavanja [12]

Ne postoji linija koja razgraničava željezo od cinka, nego stupnjeviti prijelaz od čistog željeza do čistog cinka i to osigurava čvrstu vezu između ta dva materijala [8].

Prednost je vrućeg uranjanja što se velikom brzinom mogu obraditi velike količine robe i dobiti prevlake dobre zaštitne moći i povoljnih mehaničkih svojstava. Nedostatak je veliki gubitak rastaljenog metala i mogućnost izobličenja predmeta zbog visoke temperature u postupku [12].

3.4.1.2 Kontinuirano linijsko uranjanje

Vrlo male količine aluminija dodaju se u cinčanu kupku što omogućava dobru adheziju i dovoljnu duktilnost da je moguće duboko vučenje i savijanje bez značajnijeg oštećenja same prevlake. Većina vruće uronjenih čelika koji se koriste u izradi metalnih građevina su izrađeni metodom neprekinutih traka. Prevlake od cinka dobivene ovim procesom se razlikuju od prevlaka dobivenih vrućim uranjanjem u tome što se u ovom procesu ostvaruje legiranje između čelika i cinka.

Slika 11 prikazuje mikrografski prikaz kontinuiranih trakastih linija dobivenih galvaniziranjem, gdje se jasno vide granice između dva metala [1].



Slika 11. Mikrografski prikaz kontinuiranih trakastih linija [1]

3.4.2 Elektrokemijsko nanošenje cinka

Elektrokemijsko nanošenje cinka je hladniji proces s obzirom na toplinu koja se javlja kod vrućeg uranjanja. Većina ovih procesa su neprekidna i primjenjuju se na limove, žice, električne kablove i slične objekte. Dobiva se tanki sloj čistog cinka koji ima odlična prijanjajuća svojstva. Prevlaka je glatka, bez sjajnih karakteristika i može biti brzo pripremljena za bojanje. Prevlake na limu obično teže od 19 do 62 grama po kvadratnom metru [9].

Elektrogalvanizirani čelik može biti brzo i jednostavno pripremljen za nanošenje organskih premaza. Mnogi organski premazi imaju dobra adhezijska svojstva sa cinčanom površinom i u kombinaciji sa cinčanom podlogom produljuju životni vijek prevlaka. Na vanjskim površinama, elektrogalvanizirani proizvodi su najčešće obojeni da povećaju korozijsku otpornost i zaštite tanku cinčanu prevlaku [9].

3.4.3 Kemijsko nanošenje cinka

Kemijsko nanošenje cinka je postupak sličan elektrokemijskom nanošenju, iako nije kontinuiran i primjenjuje se kao šaržni postupak. U njemu se debljina cinka može kontrolirati tako da se vodi računa koliko je dugo predmet uronjen u kupci. Ovo je vrlo efektivna metoda nanošenja cinka na male predmete. Najčešće se koristi za predmete manjih dimenzija koji se prevrću u bubnju koji se nalazi u kupci. Kemijski cinčane prevlake su tamno sive boje. Prevlaka je od čistog cinka i homogenog je sastava [1].

3.4.4 Šerardiziranje

Šerardiziranje je proces difuzijske metalizacije iz čvrste faze koji se obično izvodi dužim grijanjem pripremljenih obradaka u praškastoj smjesi s velikim udjelom slobodnog elementa koji difundira ili njegova spoja. Za šerardiziranje služi cinkov prah [10]. Izvodi se pri temperaturama od 370 °C do 430 °C. Koristi se za relativno male dijelove. Cijevi, matice, svornjaci i ostali mali dijelovi su obrađeni na ovaj način [1].

3.4.5 Naštrcavanje

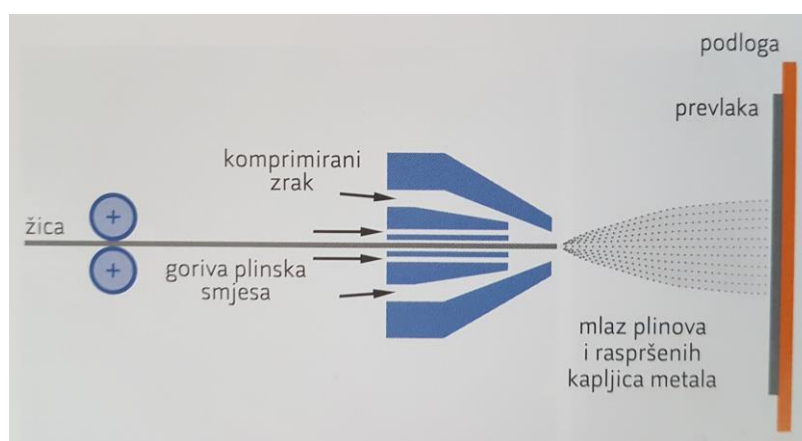
Naštrcavanje je postupak gdje je cink rastaljen u pištolju i pomoću stlačenog zraka se raspršuje na površinu čelika. Mlaz kapljica, stvoren brzom strujom zraka ili drugog plina, udara u podlogu brzinom od 50 do 850 m/s, pri čemu se kapljice spljošte, naglo hlade i skrućuju tvoreći prevlaku. To je popraćeno stezanjem tako da pločice stisnu mikroizbočine podloge prijanjajući na nju sidrenjem [12].

Čelik je najčešće ispjeskaren. Cink bi se trebao nanijeti što prije nakon što je površina bila pripremljena da bi se izbjegla oksidacija čelika i osigurao se efektivan metal - metal spoj. Spoj može biti narušen ili zbog oksidacije ili zbog temperature čelika u vrijeme kada je cink nanesen na njega.

Raspršivanje cinka može se vršiti na dva načina.

Prvi je proces u kojem se cink u obliku žice ubacuje u plamen. Struja stlačenog zraka raspršuje metal i odvodi ga iz mlaznice. Cinčana žica se dodaje neprekidno u pištolj sve dok pištolj radi.

Drugi postupak uključuje korištenje cinkovog praha. Usitnjeni cinkov prah je transportiran do pištolja pomoću plina i zagrijan pomoću plamena koji okružuje mlaznicu. Komprimirani zrak daje pokretačku silu pari rastaljenog cinka pri udaru u metal [9]. Razmak između ušća pištolja i obratka kreće se između 100 i 250 mm, pri čemu se postiže širina metaliziranog pojasa do 100mm. Debljina prevlaka iznosi 20 do 200 µm [12]. Raspršeni cink ovog tipa može se primjeniti na konstrukcije bilo koje veličine i oblika. Prevlaka ovisi o operateru koji ju nanosi i o odgovarajućoj vještini da bi se dobio gladak i ravan film na površini. Naštrcavanje cinka je teško ostvarivo, negdje i potpuno nemoguće kao što su šupljine, uglovi i slična područja [9].



Slika 12. Shematski prikaz metalizacije [12]

4. ZAVARIVANJE POCINČANIH LIMOVA

Zavarivanje pocinčanih dijelova izvodi se približno na isti način kao i nepocinčani čelici istog sastava. Isti postupak zavarivanja, napon, struja, brzina zavarivanja itd. može se koristiti uz male preinake kada se prelazi sa zavarivanja nepocinčanih čelika na pocinčane čelike, ukoliko nisu debljine cinkovog sloja jako male.

Razlika između zavarivanja pocinčanih i nepocinčanih dijelova je u niskoj temperaturi isparivanja cinkovog sloja. Cink se tali na temperaturi oko 420 °C i isparava na temperaturi od oko 900 °C dok se, s druge strane, čelik tali na temperaturi oko 1510 °C, a temperatura u električnom luku iznosi od 8 300 °C do 11 000 °C, pa prema tome cink u području zavara isparava. Sa prolaskom vremena hlađenja zavara, područje oko zavara je osiromašeno cinkom. To rezultira sa slijedećim posljedicama [13]:

- Ispareni cink povećava volumen dima i plina nastalih tokom zavarivanja
- Cink koji se nalazi u zavaru i oko zavara je spaljen od strane topline električnog luka, te ta mjesta ostaju nezaštićena.

4.1 Cinkove pare i sigurnost pri zavarivanju

Kada se cinkova para pomiješana sa kisikom u zraku, oni trenutno reagiraju te nastaje cinkov oksid. Cinkov oksid nije toksičan i nije kancerogen. Provedena su ispitivanja o efektima oksidnih cinkovih plinova te na temelju toga je zaključeno da udisanje tih plinova će uzrokovati kod zavarivača osjećaj gripe. Unatoč tome, nema dugotrajnih učinaka na zdravlje. Cinkov oksid koji se udiše, jednostavno se upija i tijelo eliminira bilo kakve komplikacije ili kronične efekte [13].

Provode se istraživanja mehanizama koje uzrokuju cinkove pare nazvane „groznica metalnih para“. Simptomi se počinju javljati nakon 4 sata izlaganja oksidima cinkovih para, a potpuni oporavak je nakon 48 sati. Simptomi koji se javljaju su: povišena temperatura, drhtavica, žeđ, glavobolja i mučnina. Svi ovi simptomi, kao i izgubljeno vrijeme rada, mogu se ukloniti tako da se ne udišu plinovi cinkovih oksida.

Cinku koji se koristi za pocinčavanje vrućim uranjanjem dodaje se između 1 i 2 % olova. Pošto olovo nije topivo u cinku iznad 0,9 %, ne smije preći granicu od 0,9 %. Ostatak ovog olova može ispariti zajedno sa cinkom tijekom zavarivanja.

Temperatura isparavanja olova je 1650 °C i jedan dio olova je topiv u čeliku. Olovo zajedno sa kisikom spaja se u olovni oksid, koji je vrlo otrovan te se ne smije dopustiti njegovo udisanje. Neke pocinčaone koriste cink čistoće 99,99 %, tako da se ne javlja prisutnost olova tijekom zavarivanja ili kontakta sa pocinčanim dijelovima [13].

4.2 Svojstva zavara

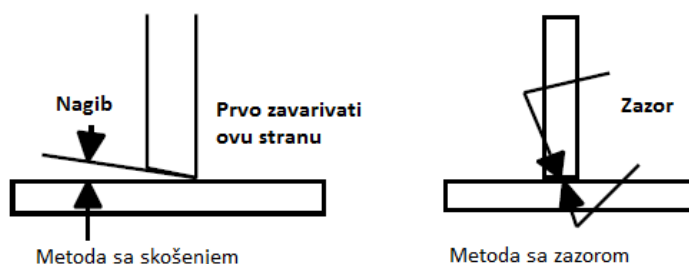
Industrija je prepoznala prije 50 godina da u pogledu čvrstoće između pocinčanih i nepocinčanih čelika nema razlike ukoliko je kvaliteta zavara jednaka. Novija istraživanja bave se sa žilavošću zavara, kontrolom poroznosti, izgledom zavara, obnavljanju korozijske postojanosti i ostalim svojstvima koja su kompleksnija od čvrstoće zavara.

Kod zavarivanja pocinčanih čelika REL postupkom koristi se ista tehnika zavarivanja kao i kod zavarivanja nepocinčanih čelika. Prilikom zavarivanja sa MIG/MAG postupkom potrebne su male korekcije napona kako bi se kontroliralo štrcanje te potrebno je češće čistiti sapnicu pištolja od kapljica metala i cinkova oksida.

Kod zavarivanja pocinčanih obradaka dolazi do povećanog nastajanja plinova. Razlog tog nastajanja je sloj cinka. Što je sloj cinka deblji, više se plinova stvara te se mora omogućiti da ti plinovi izađu iz taline zavara.

Na primjer, kod zavarivanja ploča u T-spoj javlja se problem sa odvođenjem plinova iz zavara. Kada je jedna ploča oslonjena na drugu otežano je odvođenje plinova u atmosferu. Dolazi do toga da plinovi ostaju zarobljeni u talini te se javlja poroznost. To se događa kod zavarivanja pocinčanih limova dobivenih vrućim uranjanjem kod kojih su rubovi deblji cinkovim premazom. Kako bi se riješio taj problem, razvijene su dvije metode. Jedna metoda zahtijeva da se ploče ne naslanjaju direktno jedna na drugu, već da se ostavi zazor između njih. Taj zazor je većinom oko 0,15 mm. Druga metoda zahtijeva da se napravi skušenje od 15° na rubu ploče koja se oslanja rubom, te da se u području zavarivanja ukloni sloj cinka sa jedne ili oba dvije ploče. Obije metode omogućuju lakše odvođenje plinova i povećavaju kvalitetu zavara [13].

Na slici 13 prikazane su ilustracije navedenih metoda.



Slika 13. Metode za poboljšavanje odvođenja plinova iz zavara nastalih pri zavarivanju [13]

4.3 Metode zaštite od plinova nastalih prilikom zavarivanja pocinčanih limova

Prvi korak zaštite od plinova cinkovog oksida je kvalitetna obuka zavarivača, tj. zaštita na radu. Zavarivači trebaju držati glavu podalje od plinova koji nastaju izgaranjem kako se plinovi i prašina ne bi nakupljali u njihovim zaštitnim maskama. Ako zavarivači primijete bijelu prašinu unutar svojih zaštitnih maska tokom zavarivanja to znači da se nisu dobro pozicionirali. Kod zavarivanja pocinčanih dijelova koji imaju tanku, ujednačenu prevlaku te postupak je pod zaštitnim plinom kao što su MIG/MAG, nastali plinovi tokom zavarivanja raspršuju se od strane zaštitnog plina te tako štite zavarivača od „groznice metalnih para“. Kao dodatak pozicioniranju, koriste se maske s respiratorom. One pružaju potpunu zaštitu od prašine i plinova. Komplikiranije i skuplje rješenje zaštite je sustav vlastitog okoliša kod kojih se u masku dovodi zrak. Sljedeća metoda zaštite uklanja pare prije nego što one dođu do glave zavarivača. Sastoji se od fleksibilnih cijevi koje se postavljaju u blizini zone zavarivanja i sustava za odvođenje plinova. Nedostatak je ove metode što ima malo područje djelovanja, 30 - ak cm od kraja usisne cijevi. Postoji još nekoliko metoda uklanjanja plinova: ventilacija, sustav s usisnom cijevi na pištolju za zavarivanje i stol s usisnim sustavom [13].

4.4 Obnavljanje korozijske otpornosti

Toplina nastala tokom zavarivanja isparava zaštitni sloj cinka oko zavara te stvara nezaštićeno područje. Iako preostali cink pruža određenu zaštitu, ta zaštita je oslabljena te pri atmosferskim uvjetima na tim mjestima pojavljivat će se hrđa. Za obnavljanje zaštitnog sloja koriste se zaštitni premazi na bazi cinka. Ti premazi se nalaze u sprejevima ili u kantama za mogućnost nanošenja kistovima. Prije nanošenja zaštitnog premaza, potrebno je površinu pjeskariti ili očistiti metalnom četkom. Zaštitni sloj se može obnoviti i vrućim naštrecavanjem cinka, prije kojeg je također površinu potrebno pjeskariti [13].

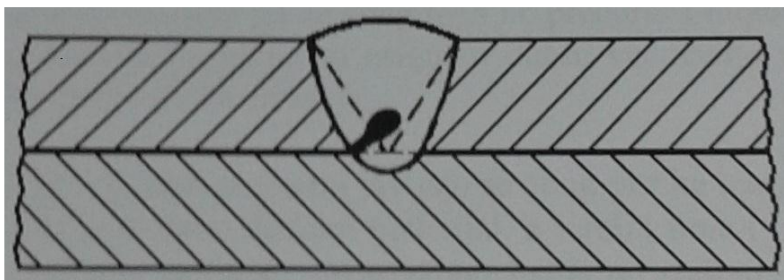
4.5 Alternativni dodatni materijali

Ugljični čelik da li on bio pocinčani ili nepocinčani može se dobro zavariti sa korištenjem elektroda od nehrđajućeg čelika. Nehrđajući čelik je elektropozitivniji od cinka i ugljičnog čelika, to znači da će u prisutnosti vlage, cink i izloženi ugljični čelik neposredno do zavara korodirati da zaštite nehrđajući čelik, što baš i nije preporučena situacija.

Sljedeći mogući dodatni metal je aluminijska bronca. Slična situacija kao i kod nehrđajućeg čelika kao dodatnog materijala [13].

4.6 Nastajanje pora i/ili pukotina u zavaru

Budući da je temperatura električnog luka (pri MIG/MAG postupku oko 1600 °C) veća od temperature isparavanja cinka, dolazi do isparavanja cinka prilikom zavarivanja. Ako se isparivanje javlja na površini onda to i ne predstavlja veliki problem, jer postoji mogućnost da ispareni cink ode u atmosferu u obliku dima pa kao takav nema značajnog utjecaja na sam zavar. Međutim, problem je kad se javlja isparavanje cinka na rubovima osnovnog materijala ili u samom zavaru. U tom slučaju cink ne može otići u atmosferu, nego pri hlađenju zavara ostaje zarobljen u metalu zavara, a pri tome dolazi do taloženja cinka na granicama zrna. Ovo taloženje dovodi do stvaranja pukotina u zavarenom spoju uz prisustvo zaostalih naprezanja. Tako zarobljenom plinskom mjehuriću cinka povećava se pritisak i kada dođe do određene granice nastaje pora ili pukotina u metalu zavara. Pore i pukotine dovode do smanjenja čvrstoće zavarenog spoja. Slika 14. prikazuje poru u zavaru [1].



Slika 14. Pora u zavaru [1]

Nove metode za zavarivanje pocinčanih limova temelje se na efektivnom sprječavanju pojave unutrašnje i vanjske poroznost zavarenog dijela.

4.7 Zavarivanje prije pocinčavanja

Čelični dijelovi se u pravilu uvijek prvo pocinčavaju zbog toga što nema praktičnog načina povrata efektivnosti pocinčanog dijela nakon zavarivanja.

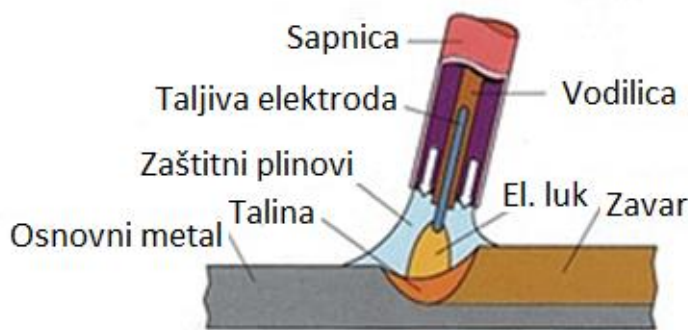
Pocinčavanje nakon zavarivanja se i dalje koristi, ali potrebno je pravilno i pažljivo primijeniti. Obratci se očiste u kiselini, kiselina treba biti neutralizirana, a tek nakon toga proizvod uroniti u tekući cink. Prije uranjanja, obradak je potrebno osušiti, jer bi zaostala voda u vrućem cinku isparavala i rezultirala prskanjem. Kod kompliciranijih konstrukcija može biti zahtjevnije nanošenje cinkovog sloja na cijelu površinu, pogotovo ako konstrukcija sadrži cijevi kod kojih mora biti omogućen slobodan tok kroz cijev. Teške i velike konstrukcije je vrlo često, gotovo i nemoguće pocinčavati u kadama za pocinčavanje.

Puno je lakše i jeftinije pocinčavati obratke prije zavarivanja [13].

5. Postupci koji se koriste za zavarivanje pocinčanih limova

5.1 MIG/MAG zavarivanje

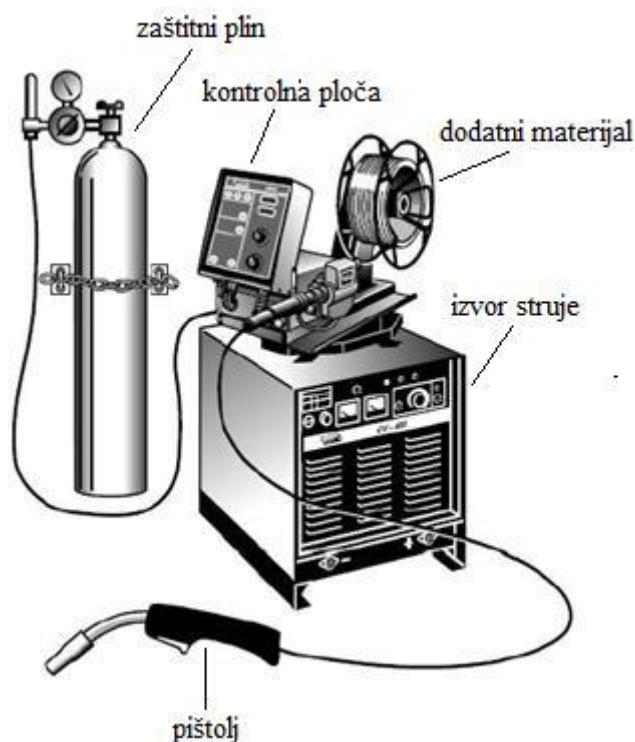
MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi. To je postupak spajanja metala taljenjem i očvršćivanjem dijela osnovnog metala i dodatnog metala pri čemu se za zaštitu rastaljenog metala koriste inertni, aktivni ili mješavine inertnih i aktivnih plinova. Mješavine plinova se koriste sa svrhom poboljšanja prijenosa metala i svojstava zavarenog spoja. Električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu spojene na pozitivni pol istosmjernog izvora i radnog komada [14]. Elektrodna žica čini dodatni materijal. Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk, sve u zaštitnoj atmosferi odgovarajućeg zaštitnog plina koji je pohranjen u vanjskom spremniku (boci), pod tlakom. Sam izvor struje je isti za oba slučaja zavarivanja (MIG i MAG). Postupak MIG/MAG zavarivanja može biti poluautomatiziran (dodavanja žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili u potpunosti automatiziran/robotiziran [5]. Slika 15 prikazuje detalj kod MIG/MAG procesa zavarivanja.



Slika 15. Detalj MIG/MAG procesa zavarivanja [15]

Osnovnu opremu za MIG/MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne ili izmjenične struje s ravnom statičkom karakteristikom (CV – eng. Constant Voltage), polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, pištolj za zavarivanje te regulator protoka zaštitnog plina (slika 16). Električna se struja dovodi iz izvora struje koji je priključen na električnu mrežu, putem vodiča od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom koja se

konstantno i automatski odmata s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Žica je istovremeno i elektroda i dodatni materijal. Zaštitni plin dolazi do mjesta zavarivanja iz boca preko polikabela kroz sapnicu pištolja. Kontaktna vodilica pištolja služi za vođenje elektrode i za dovođenje struje zavarivanja na žicu. Sapnica služi za dovod zašitnog plina. Kontakna vodilica i sapnica su potrošni dijelovi pištolja te ih se lako može zamijeniti. Pištolji za zavarivanje mogu biti hlađeni zrakom ili vodom [6].



Slika 16. Oprema za MIG/MAG zavarivanje [5]

Prednosti MIG/MAG postupka zavarivanja [1, 6]:

- Zavarivanje moguće u svim položajima,
- MIG/MAG zavarivanje je jedini postupak zavarivanja sa taljivom elektrodom koji se koristi za zavarivanje svih komercijalnih materijala,
- Veća brzina zavarivanja i veći učinak taljenja dodatnog materijala nego kod REL zavarivanja,
- Prilikom korištenja štrcajućeg luka, postiže se veća penetracija nego kod REL zavarivanja,

- Zbog kontinuiranog dovodenja elektrode, moguće je proizvesti zavare veće duljine bez prekida,
- Mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- Široki raspon debljina materijala koji se zavaruje,
- Velika učinkovitost i proizvodnost,
- Automatska regulacija visine električnog luka,
- Postoji puno podvrsta postupka koji omogućavaju široku uporabu.

Nedostatci [1, 6]:

- Zbog oblika pištolja za zavarivanje, postoje poteškoće prilikom zavarivanja teško dostupnih mjesta zavarenih spojeva,
- Oprema je složena i skuplja u odnosu na REL zavarivanje,
- Prilikom rada na terenu moguće su greške zbog zaštite mjesta zavarivanja (vjetar može otpuhati zaštitni plin),
- Mogući problemi kod dovodenja žice (zastoj žice u polikabelu),
- Mogućnost pojavljivanja prskanja (kratki spojevi, prijelazni luk).

Parametri koji se podešavaju su [6]:

- Jakost struje,
- Napon električnog luka,
- Veličina induktiviteta (uspona struje),
- Promjer žice,
- Brzina zavarivanja,
- Protočna količina i vrsta zaštitnog plina,
- Dužina slobodnog kraja žice.

5.1.1 Postupak MIG/MAG zavarivanja pocinčanih limova

Prevlaka cinka prilikom zavarivanja postupcima MIG/MAG ne utječe na svojstva zavara, jedino što se pojavljuje je štrcanje. Štrcanje se smanjuje modificiranim postupcima prijenosa metala kod MIG/MAG-a. Odlična je stabilnost luka i ne utječe na prevlaku.

Koriste se žice dodatnog materijala promjera od 0,8 mm do 1,6 mm. Zbog malog promjera žice dodatnog materijala dolazi do velike gustoće struje koja iznosi oko 200 A/mm^2 . Koristi se izvor sa konstantnim naponom čime se omogućava trenutno samopodešanje visine električnog luka, tako da je visina električnog luka približno jednaka.

Izvori struje su konstruirani tako da pojačavaju struju zavarivanja sa skraćanjem električnog luka pa se dodatni materijal brže tali i duljina električnog luka ostaje jednaka.

Kada zavarivač poveća duljinu električnog luka, struja se smanjuje, potrošnja žice se smanjuje a duljina električnog luka ostaje ista [16].

Prijenosi metala koji se najčešće koriste kod zavarivanja pocinčanih limova [16]:

1. Prijenos štrcajućim lukom – vrsta procesa koja koristi visoki napon i struju, te se koristi za zavarivanje u horizontalnom položaju, dovoljno debelih ploča da se spriječi protaljivanje zbog visokog unosa topline
2. Prijenos kratkim spojevima – vrsta procesa koja koristi nisku struju i napon, koristi se zavarivanje tankih limova.

5.1.2 Zaštitni plinovi

Za zavarivanje pocinčanih limova najčešće se koristi CO_2 kao zaštitni plin jer omogućuje odličnu penetraciju ali uzrokuje i pojavu štrcanja. Alternativno tome, koriste se mješavine Ar/CO_2 ili $\text{Ar/CO}_2/\text{O}_2$ koje su skuplje, ali omogućuju dobru penetraciju, dobro nadvišenje zavara i manje štrcanja. Mješavina od 92 % Ar , 5 % CO_2 i 3 % O_2 koristi se za zavarivanje limova debljine do 3 mm [16].

5.1.3 Parametri zavarivanja

Brzina zavarivanja pocinčanih limova treba biti manja od brzine zavarivanja nepocinčanih čelika da bi se omogućilo vrijeme potrebno cinku da izgori ispred taline. Smanjenje brzine zavarivanja proporcionalno je debljini pocinčanog sloja, vrsti spoja i položaju zavarivanja. Prosječno je brzina zavarivanja manja za 10 do 20 %.

Prilikom zavarivanja kutnih spojeva poželjno je povećati struju zavarivanja za 10 A. Povećani unos topline pomaže da se sagori cink ispred taline.

Penetracija je manja kod pocinčanih čelika nego kod nepocinčanih čelika te se zbog toga kod sučeonih zavara mora ostaviti veći razmak između dijelova koji se spajaju. Lagano njihanje

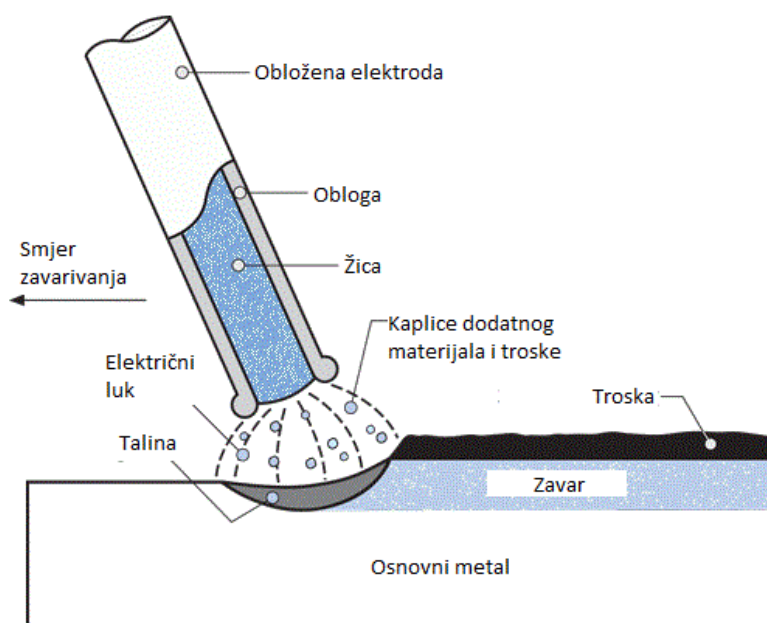
tokom zavarivanja pomaže da se ostvari podjednaka penetracija sučeonih zavora u horizontalnom položaju.

Da bi ostvarila potpuna penetracija u nadglavnom položaju zavarivanja ploča sa 600 g/m^2 pocinčanog sloja, struja zavarivanja mora se povećati za 10 A i napon za 1 V.

Prilikom zavarivanja pocinčanih dijelova u vertikalnom položaju, brzina zavarivanja prosječno se smanjuje za 25 do 30 % u odnosu na nepocinčane dijelove ovisno od vrsti spoja i debljini cinka. Brzina se smanjuje da se električni luk ustabili zbog utjecaja cinkovih para na sam električni luk [16].

5.2 REL zavarivanje

Najčešće korišteni ručni proces zavarivanja je zavarivanje obloženom elektrodom. Parametri zavarivanja pocinčanih limova su slični kao kod zavarivanja nepocinčanih limova. Potrebno je sporije zavarivanje uz blaži nagib elektrode od 30° te potrebno je njihanje elektrode da se otopljeni cink makne iz zavora.



Slika 17. Detalj REL zavarivanja [17]

Duljine elektrode su u rasponu od 23 do 46 cm te debljine od 1,6 do 8 mm. Najveća razlika u zavarivanju pocinčanih limova je ta da se mora ostaviti veći razmak između limova koji se spajaju da bi se dobila potpuna penetracija. Dobiva se veća količina štrcanja nego kod zavarivanja nepocinčanih čelika.

REL postupak zavarivanja prikladan je za zavarivanje pocinčanih čelika debljine veće od 13 mm. Prilikom zavarivanja pocinčanih čelika se mogu koristiti iste tehnike kao i kod zavarivanja nepocinčanih čelika, ali se treba paziti na [17]:

- Zavarivanje treba biti sporije i tehnikom njihanja omogućiti da cink izađe iz zavara,
- Zavarivanje u više prolaza treba se izbjegavati, pretjerani unos topline može uzrokovati oštećenja prevučenog sloja u blizini zavara,
- Preporučena je mala duljina električnog luka u svim pozicijama zavarivanja, postiže se bolja kontrola električnog luka i penetracija,
- Veći razmak prilikom sučeonog zavarivanja pocinčanih čelika,
- Uklanjanje oštih bridova koji se zavaruju, osiguravaju bolji zavar.

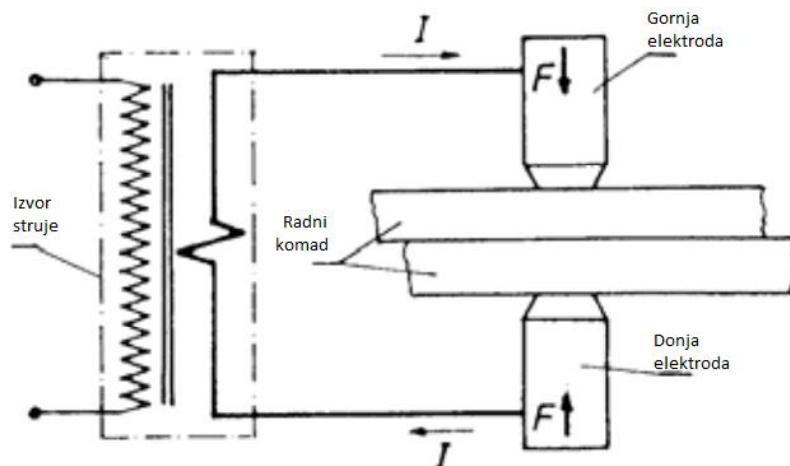
5.3 Elektrootporno točkasto zavarivanje

Elektrootporno zavarivanje obuhvaća grupu postupaka kod kojih se materijal zagrijava toplinom stvorenom električnim otporom, a zavareni spoj nastaje dodatnim djelovanjem sile pritiska između elektroda. Najčešći je najjednostavniji postupak zavarivanja pogodan za automatizirano ili robotizirano zavarivanje. Električnim otporom stvara se toplina koja se koristi za zagrijavanje određene količine materijala na temperaturu zavarivanja kao i za zagrijavanje materijala u okolnoj zoni. Koristi se izmjenična struja niskog napona i visoke struje kratkog trajanja. Ograničenja elektroopornog točkastog zavarivanja su u pogledu geometrijskog izgleda dijelova koji se zavaruju i nemogućnost postizanja hermetičnosti spoja [18].

Elektrootporno točkasto zavarivanje je postupak spajanja kombiniranim djelovanjem topline, dobijene električnim otporom u zatvorenom strujnom krugu između dva lima pritisnuta elektrodama u obliku šipke i sile pritiska elektroda kroz koje se dovodi struja. Na dodirnom se mjestu obiju dijelova koji se zavaruju oslobađa Juleova toplina, koja rastali materijal te dolazi do njihovog miješanja. Nastali zavar ima oblik točke, a presjek je u obliku leće [18].

Zagrijavanje pri elektrootpornom zavarivanju je kratkotrajno (od mikrosekunde do nekoliko sekundi) i neravnomjerno, pri čemu se najviše zagrijava središnji dio točke (jezgra), gdje je iznos struje najveći. U početnoj fazi zagrijavanja u jezgri počinje nastajanje krupnih zrna pod djelovanjem sile pritiska, tj. zavarivanje bez taljenja. Daljnjim zagrijavanjem jezgra se tali, a

njegovim očvršćivanjem dobije se zavarena točka. Na slici 18 prikazana je shema elektrootpornog točkastog zavarivanja [18].



Slika 18. Shema elektrootpornog točkastog zavarivanja [18]

Dugo je bilo problematično zavarivanje pocinčanih limova pomoću elektrootpornog točkastog zavarivanja. No, uz pomoć različitih istraživanja i iskustva iz industrije riješen je taj problem. Osnovni problem prilikom zavarivanja pocinčanih limova je generiranje dovoljnog unosa topline za zavarivanje, a da se pri tome ne ošteti sloj cinka. Djelovanjem topline zavarivanja, cink se spaja sa bakrom iz elektroda i stvara se mjed. Elektrode na kojima nastaje mjed, stvara se dodatni otpor te samim time oslobađa se više topline. S ponavljanjem zavarivanja, sloj mjedi se povećava, dovodi se više topline, a kvaliteta samog zavara pada. Jedno rješenje tog problema je kontroliranje struje zavarivanja. Provodi se tako da se struja smanjuje sa povećanjem sloja mjedi, čime se dobiva jednak unos topline. Životni vijek elektroda kod zavarivanja pocinčanih limova je manji nego kod elektroda za zavarivanje nepocinčanih limova. Uzrok tome je duže vrijeme zavarivanja pocinčanih limova [1].

Elektrootporno točkasto zavarivanje pocinčanih limova koristi se za debljine manje od 6 mm i masa po površini sloja cinka manje od 305 g/m^2 . Pocinčani čelici sa masom po površini sloja cinka do 460 g/m^2 se dobro zavaruju, ali je životni vijek elektroda puno manji. Pri zavarivanju debljih prevlaka cinka, elektrode je potrebno češće mijenjati. Pocinčani limovi mogu se zavarivati bez uklanjanja i oštećenja sloja cinka [17].

Produljivanje vijeka trajanja elektroda moguće je ostvariti impulsnim zavarivanjem. Impulsnim se zavarivanjem omogućuje da se jedan duži impuls podijeli na tri kraća. Nakon nekoliko zavara uzima se vrijeme za ohlađivanje čime se produžuje vijek trajanja elektroda.

Druga pozitivna strana impulsnog zavarivanja je što omogućuje kvalitetnije zavare. Navedene metode su dosta skupe pa su razvijene kapice za elektrode. Kapice su napravljene od posebnih legura čime se povećava vijek trajanja elektrode. Nakon kada se kapice istroše, jednostavno se zamijene novima [1].

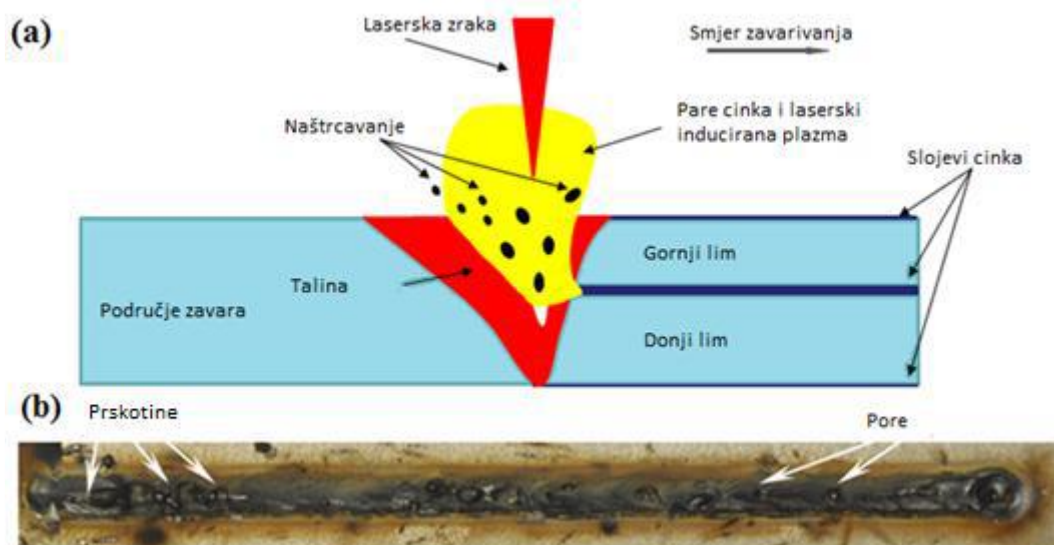
5.4 Zavarivanje laserom

Zavarivanje laserom je postupak kod kojeg se koristi fokusirana laserska zraka kao izvor topline, koja služi za spajanje radnih komada. Fokusirana zraka sadrži visoku gustoću energije te time se omogućava veće brzine zavarivanja, duboka penetracija i uska zona utjecaja topline [19].

Zavarivanje laserom uglavno se provodi bez dodatnog materijala, a postupak se dijeli na:

- zavarivanje protaljivanjem – efekt ključanice (eng. keyhole),
- zavarivanje taljenjem.

Prednost laserskog zavarivanja nad elektrootpornim zavarivanjem je ta što se pomoću optičkih vlakana ili zrcala, prenosi laserska zraka čime se omogućava zavarivanje kompliciranijih dijelova. Laserski uređaj, osim cijevi u kojoj se odvija stvaranje zrake, sadrži izvor struje, rashladni sustav, te sustav za dobavu plinova i upravljanje. Lasersko zavarivanje je zbog toga sve popularnije u automobilske industriji. Unatoč tome, zavarivanje laserom pocinčanih dijelova u automobilske industriji stvara određene probleme. Zbog niske točke vrelišta cinka u odnosu na temperaturu tališta čelika, pare cinka uzrokuju štrcanje i poroznost u metalu zavara. Time se znatno smanjuju mehanička i korozijska svojstva zavara i osnovnog metala, te sam izgled radnog komada. Sve do danas još nisu riješeni problemi sa isparivanjem cinka tokom zavarivanja laserom. Najčešće se sloj cinka uklanja prije zavarivanja ili isparava dodatnim izvorom topline ili se osigurava dodatni odvod cinkovih para da se izbjegne štrcanje i poroznost [19]. Slika 19a prikazuje detalj zavarivanja laserom pocinčanih limova, a na slici 19b je prikazan zavar s greškama koje se javljaju.



Slika 19. a) Detalj zavarivanja laserom pocinčanih limova

b) Prikaz zavora s greškama [20]

Tijekom nekoliko desetljeća, zajedničkim djelovanjima industrije i visokih učilišta, razvijene su nove tehnologije za zavarivanje pocinčanih limova laserom. Međutim, svaka od tih tehnologija ima problema sa integracijom u industriji. Zadovoljavajuća kvaliteta zavora moguća je uz smanjivanje snage lasera/smanjivanje brzine zavarivanja, ali ta smanjenja uvelike utječu na samu produktivnost [20].

5.5 Lemljenje

Lemljenje je postupak spajanja materijala pomoću rastaljenog dodatnog metala (lema), čija je temperatura taljenja niža od temperature taljenja osnovnog materijala. Osnovni materijal je kvašen lemom, bez da se sam tali [14].

Razlozi zbog kojih je uveden postupak lemljenja su sljedeći [14]:

- Lemljenje se daje vrlo lako mehanizirati i automatizirati, te je zbog toga pogodno za serijsku i masovnu proizvodnju,
- Ne tali se osnovni metal pa ne dolazi do većih strukturnih promjena,
- Vrlo lako se spajaju raznorodni metali,
- Postupak je dosta brz,
- Deformacije radnog komada su minimalne,
- Nije potrebna naknadna mehanička obrada zalemljenog spoja.

Podjela lemljenja čini se prema sljedećim kriterijima [14]:

- Radna temperatura [meko (temperatura tališta $< 450\text{ }^{\circ}$) i tvrdo (temperatura tališta $> 450\text{ }^{\circ}$)]
- Oblik spoja (kapilarno lemljenje, lemljenje u žlijebu, lemljenje nanošenjem)
- Način zagrijavanja (plinski, indukcijski, u peći, itd.)
- Vrsta zaštitne atmosfere (zrak, zaštitni plin, vakuum)
- Način uklanjanja oksida za vrijeme lemljenja (talilo, reducirajući plin, vakuum, itd.).

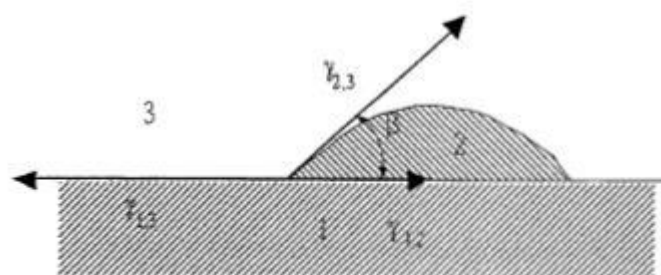
Bitna razlika između postupaka je u mehaničkim svojstvima spoja, a ne u mehanizmu nastajanja spoja. Budući da je temperatura tališta dodatnog materijala niža od temperature osnovnog materijala ne dolazi do taljenja osnovnog materijala, a samim time i do mijenjanja njegove prvobitne strukture [1].

Osim metala danas se uspješno lemljenjem spaja i keramika koja je sve značajniji konstrukcijski materijal, naročito u elektronici i vakumskoj tehnici.

Zalemljeni spoj se ostvaruje na osnovi sljedećih pojava [14]:

- Kvašenje površine osnovnog metala lemom,
- Adhezijske sile,
- Difuzija,
- Mehaničko sidrenje.

Da bi došlo do kvašenja krute faze (osnovnog metala) tekućom (rastaljenim lemom) potrebna je energija koja se dovodi toplotom, te je kvašenje to bolje što je temperatura viša. Sljedeći uvjet kvašenja je da su površinske veze metala slobodne, to jest da na njima nema oksida, prevlaka i nečistoća. Adhezijske sile između lema i osnovnog metala moraju svladati kohezijske sile samog lema. Površina se čisti mehanički i kemijski prije samog lemljenja. Kemijsko čišćenje se za vrijeme samog lemljenja vrši najčešće pomoću talila koje rastvara površinski sloj i reducira oksidni sloj čime štiti cijelu površinu od daljnje oksidacije. Kvašenje se definira kutem na mjestu spoja lema i osnovnog materijala [14]. Slika 20 prikazuje smjer djelovanja sila površinske napetosti na granicama medija.



Slika 20. Sile na granicama medija [14]

1 – osnovni materijal

2 – lem

3 – atmosfera u kojoj se lemi

$\gamma_{1,2}$ – sila površinske napetosti između osnovnog metala i lema

$\gamma_{2,3}$ – sila površinske napetosti između lema i atmosfere u kojoj se lemi

$\gamma_{1,3}$ – sila površinske napetosti između osnovnog materijala i atmosfere u kojoj se lemi

β – kut kvašenja

Kriteriji ocjene kvašenja su [14]:

$\beta < 30^\circ$ - dobro kvašenje

$30^\circ < \beta < 80^\circ$ - otežano kvašenje

$\beta > 80^\circ$ - loše kvašenje

5.5.1 Tvrdo lemljenje [21]

Pocinčani čelici mogu se tvrdo lemiti uz visokofrekventni indukcijski izvor topline koji daje dobre rezultate lema. Dodatni materijal je od silikonske bronce ili 60 % bakra i 40 % cinka. Pažljivim unosom topline mogu se postići dobri lemljeni spojevi uz mala oštećenja slojeva cinka.

Spojevi dobiveni tvrdim lemljenjem izvode se pri nižim temperaturama od zavarenih spojeva. Osnovni metal nije rastaljen i manje je gubitka prevučenog cinkovog sloja. Primjenom odgovarajućih lemljenih legura stvara se dobra korozijska otpornost zavora.

5.5.2 Meko lemljenje [21]

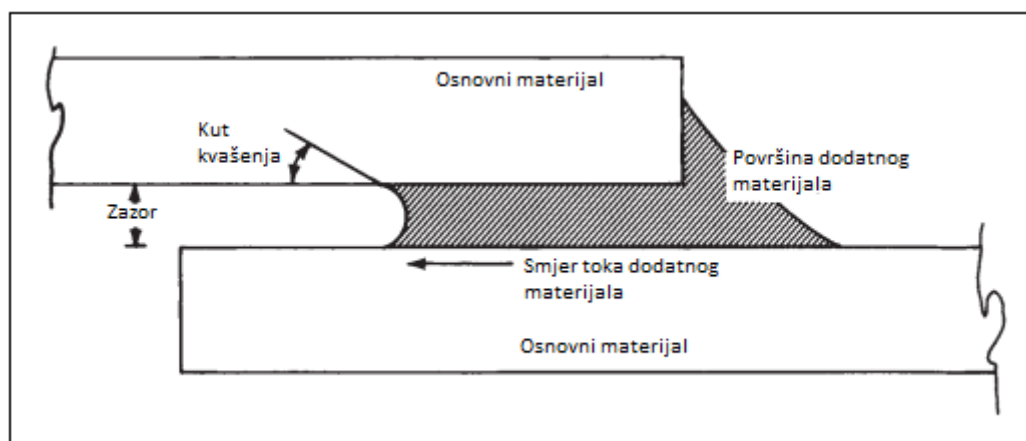
Pocinčani čelici dobiveni vrućim uranjanjem mogu se meko lemiti pomoću dodataka ili organskog talila. Talila na bazi cinkovog klorida ili amonijevog klorida obično su prikladni za lemове od kositra i olova koji sadrže 20 do 50 % kositra. Najčešće korišteni sastav za lemljenje je 40 % kositra i 60 % olova. Za izvor topline koristi se lemilica.

Vruće pocinčani čelici koji su još fosfatirani, teško se leme. Da bi se mogli lemiti potrebno je sloj fosfora ukloniti prije lemljenja.

5.5.3 MIG lemljenje

MIG lemljenje je postupak spajanja taljenjem elektrode korištenjem električnog luka. Taljenje se odvija u zaštitnoj atmosferi koja može biti od inertnih plinova ili mješavina plinova. Temperatura MIG lemljenja su u rasponu od 960 °C do 1000 °C. U tom rasponu ne dolazi do taljenja osnovnog materijala, tali se samo dodatni materijal. Pri tome ne dolazi do miješanja dodatnog materijala s osnovnim materijalom. Spoj se ostvaruje mehaničkim sidrenjem i površinskom difuzijom dodatnog materijala u osnovni materijal [21].

Slika 21 prikazuje detalj lemljenog spoja [21].



Slika 21. Detalj zalemljenog spoja [21]

Električni luk uspostavlja se između elektrode koja je spojena na pozitivan (+) pol izvora istosmjerne struje i osnovnog materijala. Žica se tali toplinom nastalom u električnom luku.

Za MIG lemljenje koristi se u načelu ista oprema koja se koristi i za MIG/MAG zavarivanje.

Žica za MIG lemljenje niže je čvrstoće nego obična žica za MIG zavarivanje. Zbog niske čvrstoće žice poželjno je da duljina polikabela ne prelazi 3 metra.

Dodatni materijali koji se koriste za MIG lemljenje moraju sadržavati minimalno 80 % bakra, ostali legirajući elementi su: silicij, aluminij, kositar, mangan, nikal i dr.

Za MIG lemljenje pocinčanih limova koristi se najčešće žica oznake SG – CuSi3 [21].

5.5.3.1 Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi imaju veliki utjecaj na izgled i geometriju spoja, brzinu lemljenja, stabilnost procesa, pojavu štrcanja, kvašenje, unos topline, pojavu poroznosti itd.

Protok plina čini važan čimbenik i ovisi o načinu prijenosa metala i ostalim utjecajnim parametrima. Protok plina kreće se u vrijednostima od 10 l/min do 20 l/min za žicu promjera 1 milimetar. U tablici 4 prikazani su najčešće korišteni zaštitni plinovi [21].

Tablica 4. Najčešće korišteni zaštitni plinovi [21]

Zaštitni plin
Ar + 1 % O ₂
Ar
Ar + 2,5 % CO ₂
Ar + 2 % H ₂
Ar + 2 % N ₂
Ar + 30 % He

Najčešće korišteni zaštitni plin je argon ili mješavine plinova s argonom. Argonom se ostvaruje dobra stabilnost električnog luka, prihvatljiv izgled spoja, dobro nadvišenje spoja i dobro kvašenje. Nepoželjan utjecaj argona kao zaštitnog plina je taj što povećava širinu ZUT-a [21].

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada izveden je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu na Katedri za zavarene konstrukcije. Eksperiment je proveden u Laboratoriju za zavarivanje.

U eksperimentalnom dijelu rada bilo je potrebno definirati tehnologiju zavarivanja pocinčanih limova različitih debljina cinkove prevlake, odabrati vrstu dodatnog materijala i zaštitnih plinova. Također, potrebno je bilo ocijeniti utjecaj parametara na kvalitetu zavara kao i površinu pocinčanog sloja.

Za eksperiment su korišteni pocinčani limovi sa različitim debljinama cinkove prevlake. Spajanje je izvedeno MIG lemljenjem uz konvencionalni i CBT (DC low spatter) prijenos metala. MIG lemljenje odabrano je radi korištenja dodatnog materijala žice CuSi3 koja ima niže talište od osnovnog materijala. Spoj se ostvaruje taljenjem dodatnog materijala te kvašenjem i spajanjem s osnovnim materijalom. Praćene su karakteristike električnog luka tokom spajanja, a nakon spajanja ocijenjen je sam izgled spoja i površine radnih komada u okolini zalemljenog spoja, nakon kojeg je uslijedila usporedba i analiza tih rezultata. Iz svih zalemljenih spojeva izrađeni su makroizbrusci te je na njima napravljena analiza.

6.1 Mjerenje debljine pocinčanih slojeva i priprema za lemljenje

Prvi dio eksperimentalnog dijela je nasumice odabiranje pocinčanih limova sa zadanim debljinama pocinčanog sloja zadanim od proizvođača. Osnovni materijal je čelik S355, dimenzije limova su (DxŠ), [mm]: 300 x 150. Debljine cinkovog sloja su u vrijednostima od 5 – 8 μm , 10 – 15 μm i 15 – 20 μm . Provedena je kontrola cinkovog sloja u Laboratoriju za zaštitu materijala. Za mjerenje debljine cinkovog sloja korišten je uređaj Elcometer 456 Model B (slika 22).



Slika 22. Elcometer 456 Model B

Za svaki raspon vrijednosti cinkovog sloja uzeto je po 4 pocinčana lima na kojima je provedeno po 10 mjerenja debljine cinka. Izmjerene vrijednosti dane su u tablici 5.

Tablica 5. Izmjerene vrijednosti pocinčanih limova

LIMOV 5 - 8 μm	\bar{x} , μm	Lo , μm	Hi , μm	σ	CV, %
1	2,69	2,1	3,8	0,53	19,5
2	6,04	3,5	9,3	2	33,1
3	2,54	1,3	4	1,01	39,8
4	6,11	4,9	8	1,11	18,1
LIMOV 10 - 15 μm					
1	10,77	8,7	13,8	1,74	16,2
2	12,41	8,4	19,2	3,46	27,9
3	14,01	10,8	19,2	2,9	20,7
4	12,41	10,3	16,2	2,09	16,8
LIMOV 15 - 20 μm					
1	8,04	5,6	11,7	2,11	26,2
2	22,04	17,6	25,2	2,6	11,8
3	20,34	15,8	25,7	3,23	15,9
4	23,56	18,2	36,2	5,64	23,9

gdje je: \bar{x} - srednja vrijednost, Lo – najniža vrijednost, Hi – najviša vrijednost, σ – standardna devijacija, CV – koeficijent varijacije

U tablici 5 prikazuje se da izmjerene vrijednosti ne odgovaraju vrijednostima koje su zadane od strane pocinčaone. Limovi koji su odabrani za daljnje ispitivanje su sljedeći:

- **GRUPA A: 2** (debljina pocinčane prevlake 6,04 μm) i **4** (debljina pocinčane prevlake 6,11 μm)
- **GRUPA B: 1** (debljina pocinčane prevlake 10,77 μm) i **2** (debljina pocinčane prevlake 12,41 μm)
- **GRUPA C: 2** (debljina pocinčane prevlake 22,04 μm) i **3** (debljina pocinčane prevlake 20,34 μm)

6.3 Postupak spajanja

Izvođenje eksperimenta je s MIG lemljenjem uz konvencionalni (DC) i CBT (DC low spatter) prijenos metala. Kod MIG lemljenja, temperatura taljenja dodatnog materijala je niža od temperature taljenja osnovnog materijala. Odabrani dodatni materijal je žica CuSi3 kojoj je talište oko 980 °C dok je talište osnovnog materijala približno 1100 °C tako da ne dolazi do miješanja osnovnog i dodatnog materijala.

Žica CuSi3 je korozijski otporan materijal koji omogućuje korozijsku otpornost na mjestu samog spoja. Također, nije potrebno talilo kod korištenja ovog dodatnog materijala kao kod lemljenja ručnim lemilom ili plinskog lemljenja [23].

Na svakoj grupi pocinčanih limova provedeno je po 4 zalemljena spoja. Odabran je preklopni spoj lemljenja (slika 23). Radi malih debljina limova (3 mm) nije potrebna mehanička priprema rubova. Prije samog lemljenja, limovi su očišćeni i odmašćeni te se pripajaju u preklopni spoj. Ostvareni preklop je 2,5 cm. Da bi limovi ostali na mjestu tokom lemljenja, korištene su stege za pridržavanje (slika 23).



Slika 23. Limovi stegnuti za radni stol

6.4 Oprema

Korišteni izvor struje za lemljenje je Daihen Varstroj Welbee-P500L, prikazan na slici 24. To je najnovija generacija izvora struje za MIG/MAG lemljenje sa procesorom (Welbee procesor) koji je proizveden nanotehnološkim procesom te ujedno omogućuje i „low spatter“ tj. CBT prijenos metala.



Slika 24. Daihen Varstroj Welbee-P500L

Slikom 25 prikazano je korisničko sučelje uređaja Welbee – P500L na kojemu se podešavaju način rada i parametri lemljenja.

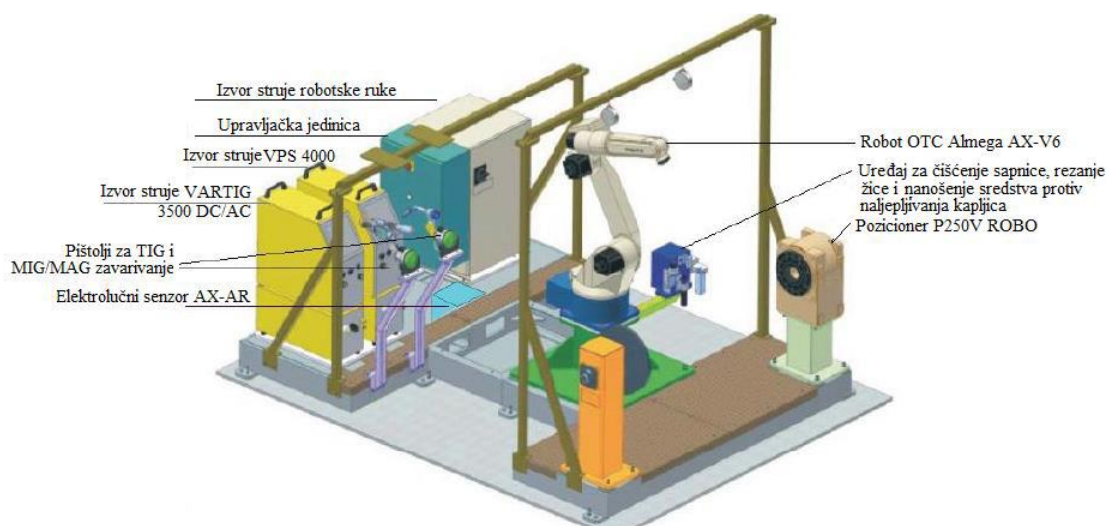


Slika 25. Sučelje za podešavanje načina rada i parametara lemljenja

Tablica 6. Tehnički podaci izvora struje za lemljenje

WB - P500L		
Način rada	DC	Impulsno
Priključni napon, V	400 +/- 15%	
Broj faza	3	
Nazivna ulazna snaga, kVA	25	
Intermitencija	60%	80%
Struja lemljenja, A	30 - 500	30 - 400
Napon lemljenja, V	pro.39	pro.34
Masa, kg	83	
Dimenzije (ŠxDxV), mm	395x710x592	

Radi postizanja konstantne brzine lemljenja, tj. za vođenje pištolja, korišten je robotiziran MAG postupak. Robotizirano lemljenje izvedeno je pomoću robotske stanice OTC Almaga AX – V6 prikazan je na slici 26. uz naznačene ostale komponente sustava.

**Slika 26. Grafički prikaz stanice za robotizirano lemljenje OTC Almaga AX – V6**

Uz naznačene sastavne komponente, robot sadrži i „shock“ senzor koji sprječava od moguće kolizije robota s objektima iz okoline. Također, opremljen je i privjeskom za učenje pomoću kojeg se izvršava on-line programiranje. On-line programiranjem unose se putanje gibanja robotske ruke i definiraju se tehnološki parametri za lemljenje. Prikazani robot ima 6 stupnjeva slobode gibanja prema kojima je u radnom prostoru moguće postići precizno pozicioniranje i orijentiranje pištolja za lemljenje.

U sklopu robotske stanice nalazi se i izvor struje Varstroj VPS 4000, ali pošto on nema mogućnosti CBT lemljenja, on nije korišten nego je spojen na robotsku ruku izvor struje WB – P500L.

6.5 Tehnološki parametri lemljenja

Konstantni tehnološki parametri lemljenja

- Tip spoja: preklopni spoj,
- Položaj lemljenja: horizontalni položaj,
- Vrsta dodatnog materijala: CuSi3,
- Promjer dodatnog materijala, [mm]: 1,
- Slobodni kraj žice, [mm]: 15,
- Nagib pištolja za lemljenje, [°]: 15,
- Tehnika rada: lijeva tehnika.

Ostali parametri su mijenjani tijekom lemljenja. Parametri za lemljenje određeni su na temelju ostalih radova obrađenih na sličnu temu. Prema tome, može se usporediti vrijednosti s drugim načinima rada i kvalitetom samog spoja.

Prilikom lemljenja korišten je zaštitni plin 100 % Ar. Argon kod horizontalnog lemljenja omogućuje jako dobru zaštitu, talinu s visokom površinskom zaštitom, stabilnost električnog luka, odgovarajuće nadvišenje zalemljenog spoja. Negativno djelovanje argona je velika širina ZUT-a. Nagib pištolja za zavarivanje je 15°. Tim se nagibom omogućuje isparavanje cinka ispred pištolja čime se ujedno i omogućuje stabilniji električni luk.

Odabrana tehnika rada je lijeva čime se smanjuje unos topline što rezultira i smanjenjem oštećenog sloja cinka oko zavora.

U slijedećim primjerima navedeni su parametri lemljenja za odabrane uzorke za različitim debljinama prevlaka, izračunat je unos topline te je analiziran svaki uzorak zalemljenog spoja.

Unos topline računa se prema izrazu [14]:

$$Q = \frac{U * I * 60}{v_z * 1000} * \eta ; kJ/cm$$

gdje je:

U – napon lemljenja, V

I – jakost struje lemljenja, A

v_z – brzina lemljenja, cm/min

η – stupanj iskorištenja postupka lemljenja (MIG = 0,8)

6.5.1 Lemljenje limova sa debljinom prevlake 5 – 8 μm

Prva skupina uzoraka lemljenih spojeva izrađena je na limovima debljine prevlake 5 – 8 μm . Prva dva uzorka lemljeni su konvencionalnom DC prijenosom metala, a druga dva uzorka zalemljeni su DC low spatter prijenosom metala.

Tablica 7. Preostali parametri lemljenja uzorka 1A

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	1A	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	5 - 8	
NAČIN LEMLJENJA	DC	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	40	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100% Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	16	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	100	118
NAPON, V	16,5	15,4
BRZINA DODAVANJA ŽICE, m/min	5,5	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	1,98	

Prema tablici 7 tijekom lemljenja je došlo do porasta struje i smanjenja napona. Porast struje je u iznosu od 18 A, a smanjenje napona od 1,1 V. Do razlike u parametrima lemljenja dolazi zbog održavanja stabilnog električnog luka. Prema slici 23, izgled i širina zalemljenog spoja su zadovoljavajući, vidljive su pore na licu zalemljenog spoja te došlo je do štrcanja. Nije došlo do protaljivanja lima i izgaranja cinka. Da bi se smanjila poroznost, na sljedećem uzorku povećava se napon lemljenja.



**Slika 27. Uzorak 1A: - gornja slika: lice zalemljenog spoja
- donja slika: naličje zalemljenog spoja**

Tablica 8. Preostali parametri lemljenja uzorka 2A

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	2A	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	5 - 8	
NAČIN LEMLJENJA	DC	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	40	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100% Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	16	
	Namještene vrijednosti	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	100	112
NAPON, V	21,5	21,1
BRZINA ŽICE, m/min	5,5	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	2,58	

Za lemljenje uzorka lema 2A uzete su veće vrijednosti napona, vrijednost napona 21,5 V, dok su ostale vrijednosti nepromijenjene prema uzorku 1A (tablica 8). Dobivene vrijednosti tijekom lemljenja manje su se mijenjale nego na prijašnjem uzorku. Dobiveni lemljeni spoj je lošijeg izgleda i veće širine nego prijašnji. Poroznost i štrcanje tijekom lemljenja je i dalje prisutno. Izgled naličja je dobar. Nije došlo do protaljivanja i izgaranja prevlake cinka. Vidljiva je šira zona ZUT-a. (slika 28).



**Slika 28. Uzorak 2A: - gornja slika: lice zalemljenog spoja
- donja slika: naličje zalemljenog spoja**

Tablica 9. Preostali parametri lemljenja uzorka 3A

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	3A	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	5 - 8	
NAČIN LEMLJENJA	DC low spatter	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	40	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100 % Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	16	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	123	111
NAPON, V	16,7	16,4
BRZINA ŽICE, m/min	5,5	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	2,47	

Prema tablici 9, za lemljenje uzorka 3A korišten je CBT način prijenosa metala uz slični unos topline kao i kod uzorka 1A. Korištena je viša struja lemljenja u iznosu od 123 A, a niža vrijednost napona u iznosu od 16,7 V. U odnosu na uzorak 1A parametri tokom lemljenja su se mijenjali tako da je struja lemljenja smanjena za 12 A, a napon ostao približno sličnog iznosa. Izgled zalemljenog spoja je zadovoljavajući. CBT načinom prijenosa metala dobiven je zalemljeni spoj sličan uzorku 1A s poroznošću i izraženim štrcanjem. Nije došlo do protaljivanja i veća je promjena boje na sloju cinka (prikazano na naličju lema).



**Slika 29. Uzorak 3A: - gornja slika: lice zalemljenog spoja
- donja slika: naličje zalemljenog spoja**

Tablica 10. Preostali parametri lemljenja uzorka 4A

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	4A	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	5 - 8	
NAČIN LEMLJENJA	DC low spatter	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	40	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100 % Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	16	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	138	128
NAPON, V	17,2	17,2
BRZINA ŽICE, m/min	6,5	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	2,85	

Prema tablici 10 povišene su sve vrijednosti: struja, napon i brzina dodavanja žice; u odnosu na prijašnje vrijednosti. Tijekom lemljenja samo se struja smanjila za 10 A. Na slici 30 prikazan je zalemljeni spoj koji nema vanjskih pora, ali je štrcanje i dalje prisutno. Izgled lica i naličja zalemljenog spoja su prilično dobri. Dužinom zalemljenog vidljive su promjene boje na sloju cinka. Veća je širina ZUT-au odnosu na prethodne uzorke.



Slika 30. Uzorak 4A: - gornja slika: lice zalemljenog spoja

- donja slika: naličje zalemljenog spoja

6.5.2 Lemljenje limova sa debljinom prevlake 10 – 15 μm

Druga skupina uzoraka provedena je lemljenjem limova s debljinom prevlake 10 – 15 μm . Prvi uzorak zalemljen je konvencionalnim DC prijenosom metala, a preostali uzorci zalemljeni su DC low spatter prijenosom metala. Očekivano je da neće biti prikladni parametri lemljenja kao i za limove s manjom debljinom cinkove prevlake.

Tablica 11. Preostali parametri lemljenja uzorka 1B

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	1B	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	10 - 15	
NAČIN LEMLJENJA	DC	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	35	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100% Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	12	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	138	148
NAPON, V	17,2	16,3
BRZINA ŽICE, m/min	7,4	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	3,26	

U tablici 11 prikazani su parametri za lemljenje lima s DC prijenosom metala. Tijekom lemljenja došlo je do porasta struje lemljenja u odnosu na zadanu vrijednost u iznosu od 10 A, napon se je u odnosu na zadanu vrijednost smanjio za 0,9 V. S ciljem smanjenja poroznosti i štrcanja smanjena je brzina lemljenja s 40 cm/min na 35 cm/min i smanjen je protok zaštitnog plina sa 16 l/min na 12 l/min. Prema prikazanoj slici 31 izgled lica zalemljenog spoja je prilično dobar, nema poroznosti i smanjeno je štrcanje. Nije došlo do protaljivanja i izgaranja sloja cinka.



Slika 31. Uzorak 1B: - gornja slika: lice zalemljenog spoja

- donja slika: naličje zalemljenog spoja

Tablica 12. Preostali parametri lemljenja uzorka 2B

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	2B	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	10 - 15	
NAČIN LEMLJENJA	DC low spatter	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	35	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100 % Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	12	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	151	142
NAPON, V	17,2	17
BRZINA ŽICE, m/min	7,4	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	3,56	

Za uzorak 2B korišten je CBT prijenos metala uz povećanje struje lemljenja na 151 A. Ostali parametri lemljenja ostali su isti kao i u prethodnom primjeru. Tijekom lemljenja vrijednost struje smanjila se na 142 A, napon ostao približno isti. Uz navedene parametre dobiveni je lemljeni spoj prikazan na slici 32. Iz slike 32 vidljiv je širi zalemljeni spoj, nema poroznosti i štrcanje je smanjeno. Radi većeg unosa topline javljaju se mjehurići na naličju zalemljenog spoja. Nije došlo do protaljivanja i izgaranja sloja cinka.

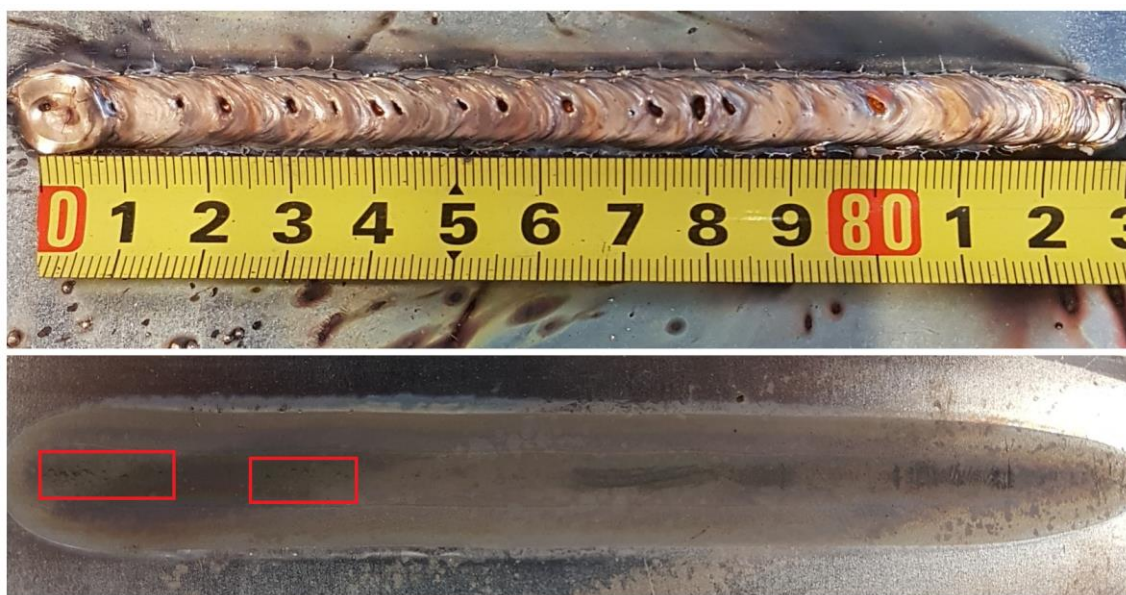


**Slika 32. Uzorak 2B: - gornja slika: lice zalemljenog spoja
- donja slika: naličje zalemljenog spoja**

Tablica 13. Preostali parametri lemljenja uzorka 3B

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	3B	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	10 - 15	
NAČIN LEMLJENJA	DC low spatter	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	35	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100 % Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	12	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	138	126
NAPON, V	17,2	17,3
BRZINA ŽICE, m/min	6,5	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	3,26	

Za uzorak 3B prema tablici 13 korišteni su slični parametri kao i za uzorak 1B uz primjenu CBT prijenos metala i nižu brzinu dodavanja žice u iznosu od 6,5 m/min. Vrijednosti koje su mijenjane tijekom lemljenja je iznos struje koja je smanjena za 12 A. Iz slike 33 zalemljeni spoj je odgovarajuće širine, vidljiva je pojava poroznosti na licu zalemljenog spoja, štrcanje je izraženije te velika je širina ZUT-a na naličju zalemljenog spoja. Radi većeg unosa topline javljaju se mjehurići na naličju zalemljenog spoja. Nije došlo do protaljivanja i izgaranja sloja cinka.



Slika 33. Uzorak 3B: - gornja slika: lice zalemljenog spoja

- donja slika: naličje zalemljenog spoja

Tablica 14. Preostali parametri lemljenja uzorka 4B

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	4B	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	10 - 15	
NAČIN LEMLJENJA	DC low spatter	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	40	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100 % Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	16	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	138	131
NAPON, V	17,2	17
BRZINA ŽICE, m/min	6,5	6,5
UNOS TOPLINE, kJ/cm	2,85	

Za uzorak 4B korišteni su isti parametri kao i za uzorak 4A. Prema tablici 14, struja lemljenja snizila se na 171 A, vrijednosti napona ostala je približno ista. Odabranim parametrima i prema slici 34 može se usporediti uzorak 4B s uzorkom 4A iz kojeg se vidi da za iste parametre pri većim debljinama cinka dolazi do poroznosti uzrokovane isparavanjem cinka. Štrcanje je jednako izraženo kod obaju uzoraka kao i područje ZUT-a. Nije došlo do protaljivanja i izgaranja sloja cinka.



**Slika 34. Uzorak 4B: - gornja slika: lice lemljenog spoja
- donja slika: naličje lemljenog spoja**

6.5.3 Lemljenje limova sa debljinom prevlake 15 – 20 μm

Treća skupina uzoraka dobivena je lemljenjem limova s debljinom prevlake 15 – 20 μm . Prvi uzorak zalemljen je konvencionalnim DC prijenosom metala, a preostali uzorci zalemljeni su DC low spatter prijenosom metala.

Tablica 15. Preostali parametri lemljenja uzorka 1C

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	1C	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	15 - 20	
NAČIN LEMLJENJA	DC	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	40	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100 % Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	16	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	138	120
NAPON, V	17,2	17,3
BRZINA ŽICE, m/min	6,5	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	2,85	

Uzorak 1C zalemljen je DC prijenosom metala. Korišteni parametri za lemljenje uzorka 1C su isti kao i u prethodnom primjeru. Došlo je do većeg smanjenja struje tijekom lemljenja. Zalemljeni spoj je dobrog izgleda, ne pojavljuje se poroznost, štrcanje je prisutno oko zalemljenog spoja dok je područje ZUT-a u naličju zalemljenog spoja usko zbog nižeg unosa topline dovedene na veću debljinu cinkove prevlake. Nije došlo to protaljivanja i izgaranja cinkove prevlake.



**Slika 35. Uzorak 1C: - gornja slika: lice zalemljenog spoja
- donja slika: naličje zalemljenog spoja**

Tablica 16. Preostali parametri lemljenja uzorka 2C

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	2C	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	15 - 20	
NAČIN LEMLJENJA	DC low spatter	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	40	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100 % Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	16	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	150	135
NAPON, V	18,3	18,4
BRZINA ŽICE, m/min	7,3	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	3,3	

Uzorak 2C zalemljen je CBT prijenosom metala. Za uzorak 2C korištene su više vrijednosti struje lemljenja, napona i brzine žice u odnosu na prethodni uzorak (tablica 16). Tijekom lemljenja snižene su vrijednosti struje za 15 A, dok je vrijednost napona ostala približno ista. Izgled zalemljenog spoja je lošiji, javlja se poroznost na licu zalemljenog spoja i prisutno je štrcanje. Široko je područje ZUT-a.



**Slika 36. Uzorak 2C: - gornja slika: lice zalemljenog spoja
- donja slika: naličje zalemljenog spoja**

Tablica 17. Preostali parametri lemljenja uzorka 3C

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	3C	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	15 - 20	
NAČIN LEMLJENJA	DC low spatter	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	40	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100 % Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	16	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	138	125
NAPON, V	18,8	19
BRZINA ŽICE, m/min	6,5	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	3,38	

Uzorak 3C zalemljen je CBT prijenosom metala. Korištena je viša vrijednost napona u odnosu na uzorak 1C. Tijekom lemljenja vrijednost struje smanjena je za 13 A, dok je vrijednost napona ostala približno jednaka. Prema slici 37 izgled zalemljenog spoja je lošiji, pojavljuje se poroznost na licu zalemljenog spoja. Zbog povećanog unosa topline dolazi do pojave mjehurića na naličju zalemljenog spoja. Široko je područje ZUT-a prevlake cinka i manja je promjena boje na naličju zalemljenog spoja. Nije došlo do protaljivanja.



**Slika 37. Uzorak 3C: - gornja slika: lice zalemljenog spoja
- donja slika: naličje zalemljenog spoja**

Tablica 18. Preostali parametri lemljenja uzorka 4C

OZNAKA ZALEMLJENOG SPOJA	4C	
DEBLJINA PREVLAKE, μm	15 - 20	
NAČIN LEMLJENJA	DC low spatter	
BRZINA LEMLJENJA, cm/min	30	
VRSTA ZAŠTITNOG PLINA	100 % Ar	
PROTOK ZAŠTITNOG PLINA, l/min	16	
	Namještena vrijednost	Vrijednost tijekom lemljenja
STRUJA LEMLJENJA, A	138	125
NAPON, V	18,8	18,9
BRZINA ŽICE, m/min	6,5	
UNOS TOPLINE, kJ/cm	4,15	

Za uzorak 4C korišteni su isti parametri kao i za lemljenje uzorka 3C uz nižu brzinu lemljenja u cilju sprječavanja poroznosti. Zbog toga dolazi do povećanja unosa topline i izgaranja prevlake cinka. Tijekom lemljenja struja je smanjena za 13 A, dok je vrijednost napona ostala približno ista. Smanjenjem brzine dodavanja žice izbjegla se poroznost, ali je i dalje prisutno štrcanje. Nije došlo do protaljivanja. Nejednolika je širina ZUT-a na sloju cinka prikazanog na naličju zalemljenog spoja.



**Slika 38. Uzorak 4C: - gornja slika: lice zalemljenog spoja
- donja slika: naličje zalemljenog spoja**

6.6 Makroizbrusci i makroskopska analiza

6.6.1 Makroizbrusci

Makroizbrusci izrezani su u Laboratoriju za zavarivanje FSB-a. Odabrana su područja na zalemljenim spojevima na kojima se ne javlja poroznost na licu zalemljenog spoja sa namjerom da se uoči da li dolazi do poroznosti u zalemljenom spoju.

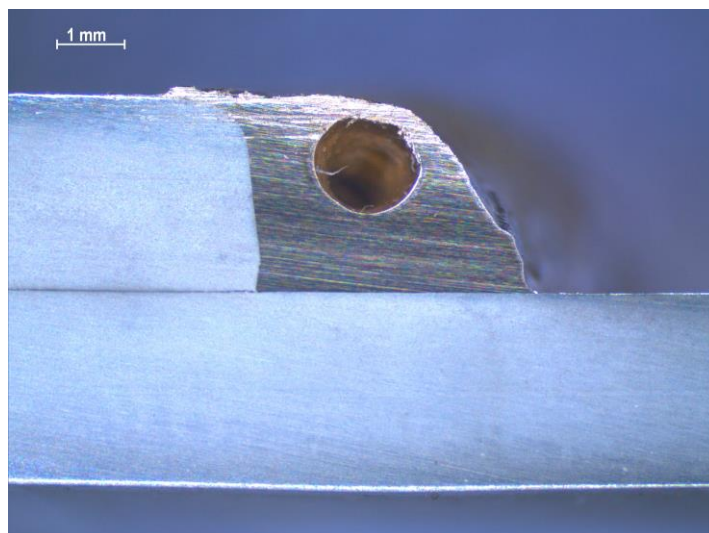
Prvi postupak nakon izrezivanja uzorka je ručno brušenje uzoraka pomoću brusnih papira. Najčešće upotrebljavani brusni papiri hrapavosti: #120, #150, #240 i #320. Broj brusnog papira predstavlja njegovu granulaciju. Ručno brušenje provedeno je brusnim papirima #80, #180, #240. Nakon ručnog brušenja, uzorci su poliraju (slika 39) u Laboratoriju za materijalografiju.



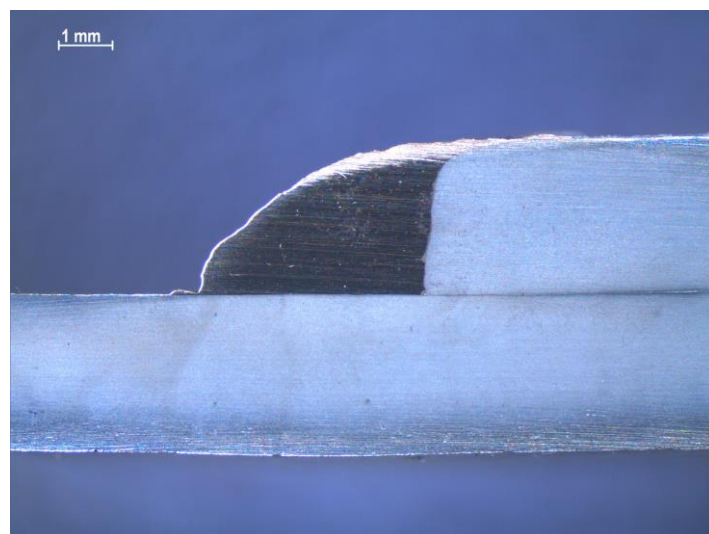
Slika 39. Stroj za poliranje uzoraka

Poliranje uzoraka izvodi se na stolu od stroja koji rotira 300 o/min. Za hlađenje, ispiranje i podmazivanje korištena je voda iz slavine. Korišteni su brusni papiri hrapavosti #320, #500, #1000, #2400, #4000. Nakon poliranja uzorci se nagrizaju u 3 % Nitalu. Obradeni makroizbrusci analiziraju se na mikroskopu Leica MZ6. Makroskopska analiza provedena je u Laboratoriju za zaštitu materijala.

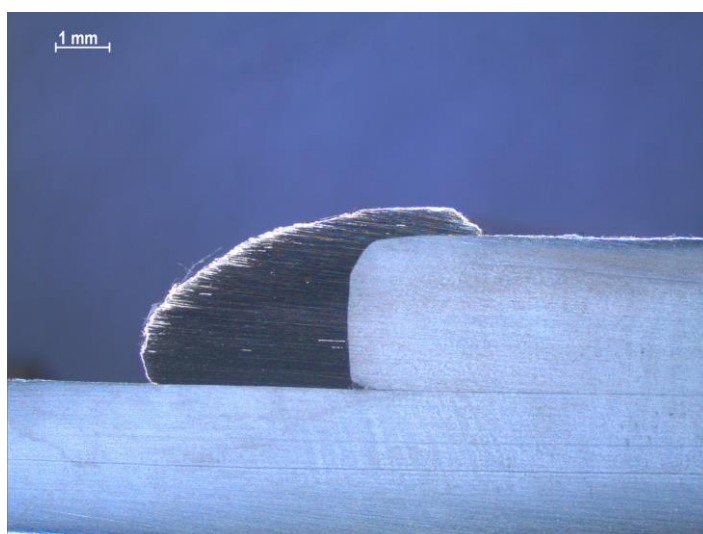
Na slikama 40., 41., 42. i 43. prikazani su detalji makroizbrusaka uzoraka A, na slikama 44., 45., 46. i 47. prikazani su detalji makroizbrusaka uzoraka B, dok su na slikama 48., 49, 50. i 51. prikazani detalji makroizbrusaka uzoraka C.



Slika 40. Makroizbrusak uzoraka 1A



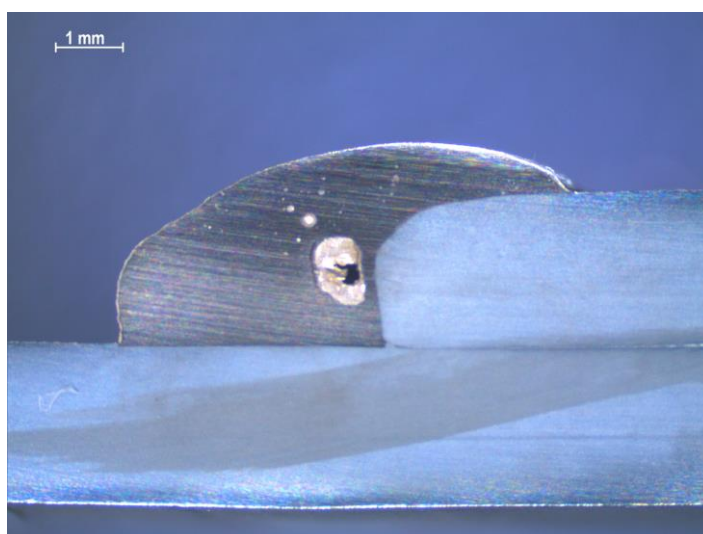
Slika 41. Makroizbrusak uzorka 2A



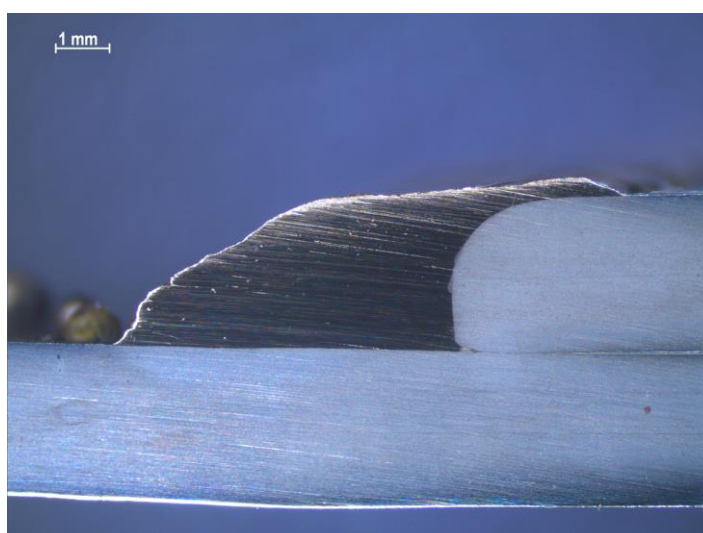
Slika 42. Makroizbrusak uzorka 3A



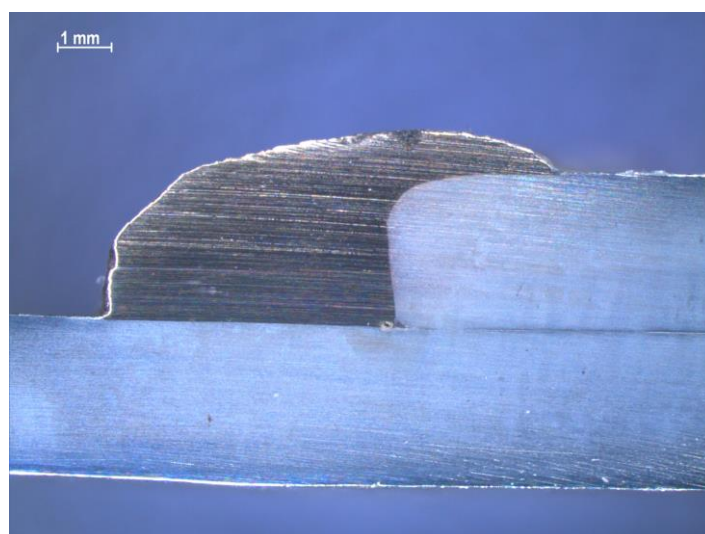
Slika 43. Makroizbrusak uzorka 4A



Slika 44. Makroizbrusak uzorka 1B



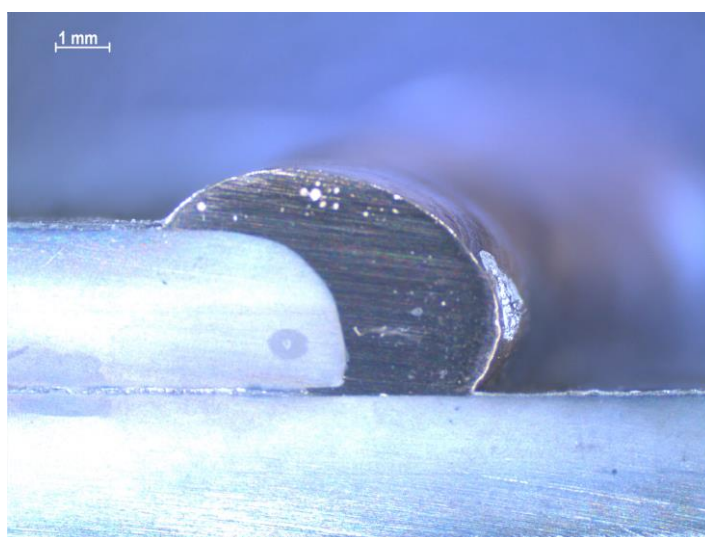
Slika 45. Makroizbrusak uzorka 2B



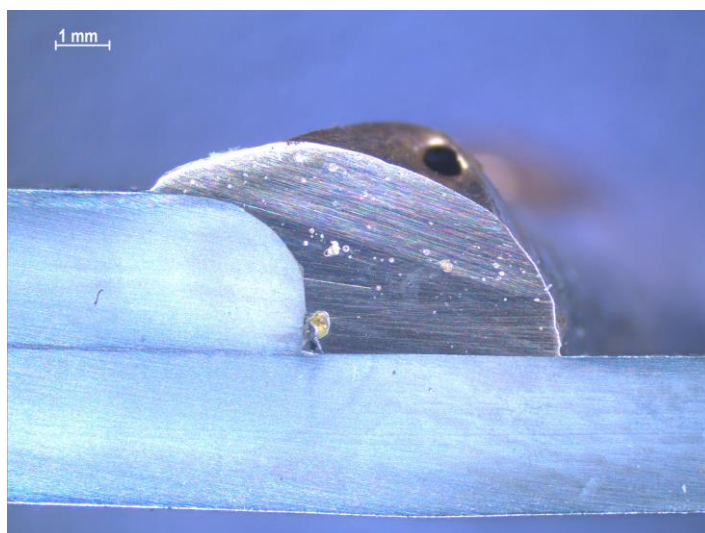
Slika 46. Makroizbrusak uzorka 3B



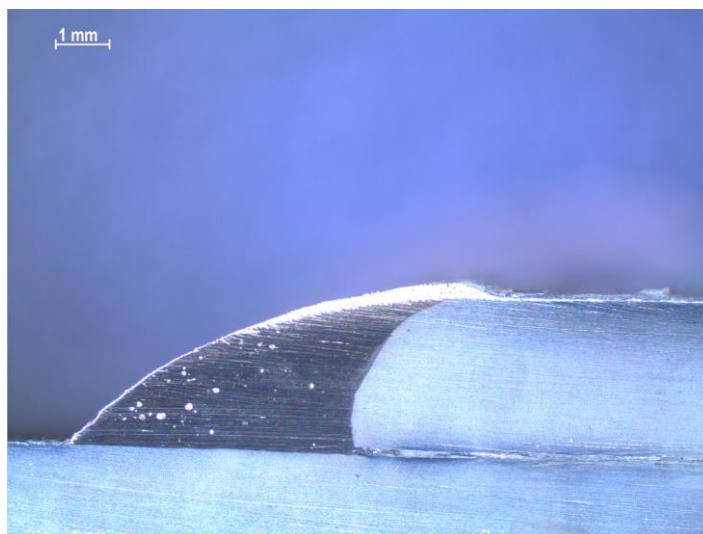
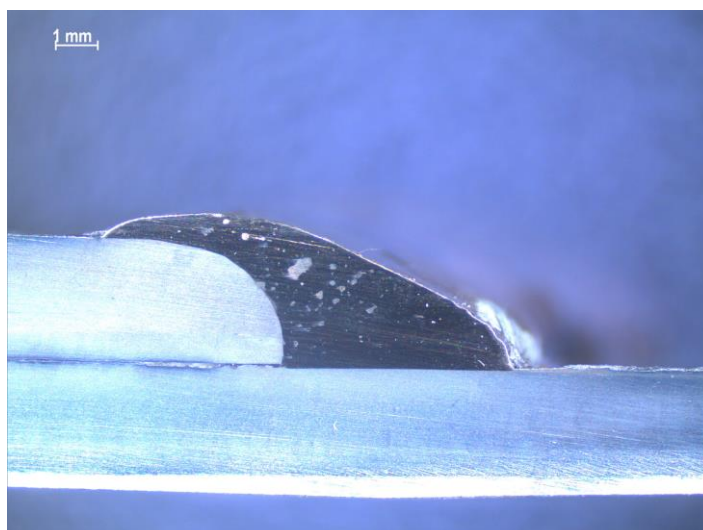
Slika 47. Makroizbrusak uzorka 4B



Slika 48. Makroizbrusak uzorka 1C



Slika 49. Makroizbrusak uzorka 2C

**Slika 50. Makroizbrusak uzorka 3C****Slika 51. Makroizbrusak uzorka 4C**

Na nekim zalemljenim spojevima vidljive su pore u zalemljenom spoju koje mogu nastati radi prevelike brzine lemljenja čime se ne dozvoli da ispareni cink izađe iz taline. Zadovoljavajući kut kvašenja ostvaruje se na uzorcima 2B, 4B, 3C i 4C. Ostali uzorci lošije su kvašeni. Zadovoljavajući kutevi kvašenja ostvareni su primjenom CBT načina prijenosa metala. Lošije kvašenje ostvareno je radi lošijeg pozicioniranja pištolja za lemljenje i niskog unosa topline. Također, kvašenje se može poboljšati uklanjanjem ili predgrijavanjem prevlake cinka na mjestu spajanja [23].

Povećanjem unosa topline mora se uzeti u obzir postojanost zaštitne prevlake cinka.

7. ZAKLJUČAK

Zavarivanje pocinčanih limova danas se sve više koristi zbog toga što se teži što lakšim konstrukcijama i kvalitetnoj zaštiti od korozije. Široko područje primjene pocinčanih limova teži razvijanju novih i kvalitetnijih postupaka zavarivanja. Zavarivanje pocinčanih predmeta puno je složenije od zavarivanja nepocinčanih predmeta. Problem stvara tanki sloj cinka koji ima nižu temperaturu tališta i vrelišta u odnosu na temperaturu metala na koji se prevlači, tj. čelik. Radi visokih temperatura sloj cinka u blizini zavara isparava što ostavlja iza sebe korozijski nezaštićeno područje, te tijekom samog zavarivanja potrebna je određena zaštita od isparavanja cinka. Na područje izgorene prevlake cinka može se ponovno nanositi prevlaka cinka koristeći premaze na bazi cinka.

Modificiranim MIG/MAG CBT postupkom zavarivanja žele se ukloniti nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima, tj. konvencionalnim načinom te povećati produktivnost zavarivanja. Najveći je nedostatak konvencionalnog načina prijenosa metala pojava štrcanja te se ona može uspješno smanjiti primjenom pravilno odabranih parametara uz CBT prijenos metala.

U eksperimentalnom dijelu rada izvedeno je MIG lemljenje limova različitih debljina cinkove prevlake uz barem jedan uzorak dobiven konvencionalnim načinom prijenosa metala, dok preostali uzorci lemljeni su CBT načinom prijenosa metala. Iz provedenih lemljenja uzoraka, vidljivo je da jednaki parametri lemljenja nisu prikladni za različite debljine cinkovih prevlaka, što je i očito jer su za veće debljine cinkove prevlake potrebne niže brzine lemljenja čime se omogućuje izlazak plinova cinka. Za niže brzine lemljenja potrebno je pripaziti da se ne unosi velika količina topline radi izgaranja cinkove prevlake u blizini zalemljenog spoja te da ne dolazi do prevelikih deformacija limova. Temeljna svrha primjene CBT načina prijenosa metala je smanjivanje pojave štrcanja. Štrcanje u ovome radu uzrokovano je zbog prisutnosti cinka i neadekvatnog odabira sinergijske krivulje što bi moglo biti predmetom daljnjeg istraživanja u tom području. Određivanje tehnologije spajanja pocinčanih limova potrebno je provesti sa određenim oprezom da bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta spoja i sama sigurnost na radu tokom samog spajanja.

LITERATURA

- [1] Udžbinac, D.: Zavarivanje pocinčanih limova; Završni rad; FSB Zagreb; 2015.
- [2] Garašić, I.; Kožuh, Z.; Remenar, M.: Analiza prijenosa metala pri MAG CBT zavarivanju, Zavarivanje vol. 57, str. 85 – 92, Zagreb, 2014.
- [3] Era, Tatsuo; Ide, Akinobu; Uezono, Toshiro; Ueyama Tomoyuki; Hirata, Yoshinori: Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheet joining, Osaka University, Osaka, Japan, 2011
- [4] Era, Tatsuo; Ide, Akinobu; Uezono, Toshiro; Ueyama Tomoyuki; Yamamoto, Hideyuki: (Garašić, Kožuh, & Remenar, 2014)
Spatter reduction of steel sheets welding using controlled bridge transfer (CBT) GMA process, IIW Doc. No. XII-1900-06
- [5] Babić, Nikola: Analiza dinamičke karakteristike MAG CBT zavarivanja, Završni rad, FSB Zagreb; 2015.
- [6] Jurica, Maja: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenog spoja čelika X80, Doktorski rad, FSB Zagreb; 2015.
- [7] Era, Tatsuo; Uezono, Toshiro; Ueyama Tomoyuki; Yamamoto, Hideyuki: Development of AC GMA welding system using controlled bridge transfer process, IIW Doc. No. XII-1937-08
- [8] Juraga, I.; Šimunović. V.; Alar, V.: Autorizirana predavanja; Korozija i zaštita; FSB, 2013.
- [9] Tumara, G.: Zaštita pocinčanih čeličnih konstrukcija vodorazrijedivim premazima; Diplomski rad; FSB Zagreb; 2011.
- [10] Esih, I.; Osnove površinske zaštite; FSB Zagreb; 2003.
- [11] <http://www.cincaonahelena.hr/cesta-pitanja-iz-podrucja-akz-a/> (18.01.2019)
- [12] Juraga, I.; Alar, V.; Stojanović, I.: Korozija i zaštita premazima; FSB Zagreb; 2014.
- [13] Sperko Engineering; Welding Galvanized Steel – Safely; The Fabricator; Ožujak; 1997.
- [14] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [15] <http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml> (22.01.2019.)
- [16] <https://www.gaa.com.au/welding/> (23.01.2019.)

- [17] American Galvanizers Association; Welding & Hot-Dip Galvanizing; 2019
- [18] Sedmak, A.; Šijački-Žeravčić, V.; Milosaljević, A. Đorđević, V.; Vukićević, M.; Mašinski materijali II deo; Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2000.
- [19] Dasgupta, A., K.; Mazumder, J.: Laser welding of zinc coated steel: an alternative to resistance spot welding; Science and Technology of Welding and Joining; 2008.
- [20] Ma, J.; Kong, F.; Kovacevic, R.; Carlson B.: Mitigating Zinc Vapor Induced Weld Defects in Laser Welding of Galvanized High-Strength Steel by Using Different Supplementary Means, SAD, 2012.
- [21] Hot Dip Galvanizers Association Southern Africa: Steel Protection By Hot Dip Galvanizing & Duplex Systems
- [22] Panjković, V.: MIG lemljenje pocinčanih limova, Završni rad, FSB, Zagreb, 2008.
- [23] Barczeli.;M.;Weltsch.;Z.: Experimental Studies of Different Strength Steels MIG Brazed Joints; Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 46(2), str. 63-68.

PRILOZI

I. CD-R disc